

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Evaluación de remoción de turbiedad de agua del canal de riego mediante tratamiento químico por coagulación-floculación con dos métodos de extracción de coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica* a escala laboratorio

Por:

Jocelyn Dianella Torres Guerra

Asesores:

Ing. Alejandro Juan Moreno Oscanoa

MSc. Javier Linkolk López Gonzales

Lima, marzo de 2019

DECLARACIÓN JURADA
DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Alejandro Juan Moreno Oscanoa, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "EVALUACIÓN DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD DE AGUA DEL CANAL DE RIEGO MEDIANTE TRATAMIENTO QUÍMICO POR COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON DOS MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE COAGULANTE DE MUCÍLAGO DE *OPUNTIA FICUS-INDICA* A ESCALA LABORATORIO" constituye la memoria que presenta la Bachiller Jocelyn Dianella Torres Guerra para aspirar al título de Profesional de Ingeniería Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima, a los cuatro días del mes de abril del año 2019.



Alejandro Juan Moreno Oscanoa
Asesor

Evaluación de remoción de turbiedad de agua de canal de riego
mediante tratamiento químico por coagulación-floculación con dos
métodos de extracción de coagulante de mucílago de Opuntia ficus-
indica a escala laboratorio


TESIS

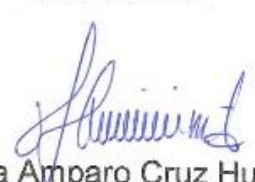
Presentada para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental


JURADO CALIFICADOR


Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez
Presidenta


Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio
Secretario


Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe
Vocal


Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga
Vocal


Ing. Alejandro Juan Moreno Oscanoa
Asesor

Lima, 11 de marzo de 2019

Agradecimiento

Agradezco con mucho amor y respeto a Dios por haberme dado todas las capacidades para poder llegar a este logro, a mi amorosa madre Gloria Guerra Aguirre y mi padre Nilo Torres Valdez, grandes seres de dedicación, trabajo y amor, que han sabido darme las fuerzas para continuar con cada sueño y meta trazada.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| Agradecimiento | iv |
| ÍNDICE DE TABLAS | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiii |
| ÍNDICE DE ANEXO | xviii |
| Símbolos usados | xix |
| RESUMEN | xx |
| Capítulo 1 | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. Objetivos..... | 10 |
| 1.1. Objetivo general..... | 10 |
| 1.2. Objetivos específicos | 10 |
| 2. Justificación de la investigación | 10 |
| 3. Presuposición filosófica | 17 |
| Capítulo 2 | 18 |
| REVISIÓN DE LITERATURA | 18 |
| 2.1. Marco legal | 18 |
| 2.1.1. Constitución Política del Perú | 18 |
| 2.1.2. Reglamento D.S. N° 001-2010-AG de ley de recursos hídricos Ley N° 29338..... | 18 |
| 2.1.3. Estándares de calidad ambiental para el agua..... | 19 |
| 2.1.4. Estándares de acuerdo a la OMS para reúso de agua residual tratada..... | 20 |
| Categoría A: | 21 |
| Categoría B: | 21 |
| 2.1.5. Estándares de acuerdo a la EPA para riego de áreas verdes | 22 |
| 3. Contaminación de las fuentes de agua de riego para áreas verdes..... | 22 |
| 4. Áreas verdes | 31 |
| 5. Turbidez del agua..... | 34 |

| | |
|--|----|
| a. Partículas coloides..... | 42 |
| b. Partículas en suspensión | 45 |
| c. Sólidos totales disueltos | 46 |
| d. Sólidos totales..... | 47 |
| 6. Proceso de coagulación y floculación para el tratamiento del agua..... | 47 |
| 6.1. Mecanismos del proceso de coagulación | 55 |
| a. Adsorción..... | 57 |
| b. Compresión de capa difusa | 59 |
| c. Barrido..... | 65 |
| d. Adsorción y formación del puente..... | 65 |
| 6.2. Sustancias usadas como coagulante | 68 |
| 6.2.1. Coagulante metálico: cloruro férrico..... | 68 |
| 6.2.2. Polímeros naturales..... | 72 |
| 7. Proceso de Floculación para el tratamiento del agua | 76 |
| 7.1. Tipos de mecanismos de floculación..... | 76 |
| 7.1.1. Floculación pericínética o browniana | 76 |
| 7.1.2. Floculación ortocinética o gradiente de velocidad..... | 77 |
| 7.1.3. Sedimentación diferencial | 77 |
| 8. Proceso de sedimentación para el tratamiento del agua..... | 78 |
| 8.1. Tipos de Sedimentación..... | 78 |
| 8.1.1. Sedimentación de partículas discretas | 78 |
| 8.1.2. Sedimentación de partículas floculentas | 79 |
| 8.1.3. Sedimentación por caída libre e interferida | 79 |
| 9. Factores que intervienen en el proceso de coagulación – floculación en pruebas de Jarras...79 | |
| 9.1. Gradiente de velocidad..... | 79 |
| 9.2. Temperatura del agua | 80 |
| 9.3. Dosis del coagulante..... | 81 |
| 9.4. Carga de turbiedad en el agua | 81 |
| 9.5. Concentración del coagulante | 81 |
| 9.6. Intensidad y tiempo de mezcla | 82 |

| | | |
|---------------------------|--|-----|
| 10. | <i>Opuntia ficus-indica</i> | 83 |
| 10.1. | Descripción botánica | 83 |
| 10.2. | Clasificación botánica | 86 |
| 10.3. | Descripción de la composición | 86 |
| 10.4. | Importancia ecológica de uso de mucílago como coagulante | 93 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | | 95 |
| 3.1. | Lugar de ejecución | 95 |
| 3.2. | Materiales e insumos | 95 |
| 3.2.1. | Materia Prima | 95 |
| 3.2.2. | Reactivos | 95 |
| 3.2.3. | Materiales y equipos | 96 |
| 3.3. | Variables de estudio | 96 |
| 4. | Métodos | 98 |
| 4.1. | Métodos de extracción de coagulante de mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> | 98 |
| 4.2. | Método de Prueba de Jarras | 99 |
| 4.3. | Método para la evaluación de la eficiencia | 100 |
| 5. | Procedimiento..... | 101 |
| 5.1. | Análisis de parámetros del agua | 101 |
| 5.2. | Diseño e implementación de las pruebas de tratabilidad a escala piloto..... | 101 |
| 5.3. | Preparación de la muestra de agua..... | 102 |
| 5.3.1. | Solución de cloruro férrico..... | 103 |
| A. | Preparación para prueba de dosis óptima con coagulante cloruro férrico | 103 |
| B. | Preparación para prueba de concentración óptima con coagulante cloruro férrico .. | 106 |
| 5.3.2. | Solución de coagulante de mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> | 108 |
| A. | Preparación para prueba de dosis óptima con mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> | 112 |
| B. | Preparación para prueba de concentración óptima con mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> .. | 114 |
| 5.4. | Tamaño y tiempo de formación de flóculo | 116 |
| 5.5. | Gradientes de velocidad | 117 |
| 5.6. | Diseño de investigación | 120 |
| 5.6.1. | Regresión lineal | 120 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 5.6.2. | Prueba Kruskal-Wallis | 122 |
| 5.6.3. | Hipótesis | 125 |
| | Capítulo 4 | 126 |
| | RESULTADOS Y DISCUSIONES | 126 |
| 4.1. | Resultados de ensayos de laboratorio de dosis y concentración óptima | 126 |
| 4.2. | Resultados con coagulante de Mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo.. | 126 |
| 4.3. | Resultados con coagulante de Mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> macerado | 137 |
| 4.4. | Resultados con coagulante cloruro férrico..... | 148 |
| 5. | Análisis estadístico | 159 |
| 5.1. | Prueba de regresión para prueba de jarras..... | 159 |
| 5.2. | Supuesto de normalidad | 161 |
| 5.3. | Diseño estadístico de kruskal wallis | 162 |
| | Capítulo 5 | 174 |
| | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 174 |
| 5.1. | Conclusiones | 174 |
| 5.2. | Recomendaciones | 177 |
| 6. | Referencias | 179 |
| | ANEXOS | 188 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----------------------|
| <i>Tabla 1</i> | |
| <i>Estándares de parámetros de calidad de agua para riego de áreas verdes establecidas por la EPA (2016)</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabla 2</i> | <i>Contaminadores</i> |
| <i>comunes de agua subterránea y fuentes asociadas de contaminación.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Tabla 3</i> | |
| <i>Descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento en el departamento de Lima (m³).....</i> | <i>27</i> |
| <i>Tabla 4</i> | |
| <i>Los principales agentes infecciosos y organismos productores de toxinas presentes en las aguas contaminadas domésticas usadas en el riego agrícola y áreas verdes</i> | <i>38</i> |
| <i>Tabla 5</i> | |
| <i>Persistencia de patógenos entéricos presentes en aguas residuales, suelo, y productos regados.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Tabla 6</i> | <i>Clasificación</i> |
| <i>del agua según su comportamiento en la coagulación.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Tabla 7</i> | |
| <i>Efecto al disminuir el tamaño de las esferas.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Tabla 8</i> | |
| <i>Incidencia en las características de la coagulación – floculación al utilizar coagulantes o ayudantes.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 9</i> | |
| <i>Métodos de análisis a parámetros químicos</i> | <i>101</i> |
| <i>Tabla 10</i> | |
| <i>Configuración para la prueba de dosis óptima con coagulante cloruro férrico a tres diferentes niveles de turbiedad</i> | <i>104</i> |

| | |
|--|----------------------|
| <i>Tabla 11</i> | |
| <i>Configuración de condiciones de mezcla en el equipo de prueba de jarras.....</i> | <i>106</i> |
| <i>Tabla 12</i> | |
| <i>Configuración para la prueba de concentración óptima con coagulante cloruro férrico.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Tabla 13</i> | <i>Configuración</i> |
| <i>para la prueba de dosis óptima para coagulante con mucílago de Opuntia ficus-indica en polvo y líquido, a diferentes niveles de turbiedad.</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabla 14</i> | |
| <i>Configuración de condiciones de mezcla en el equipo de prueba de jarras para coagulante de mucílago.....</i> | <i>114</i> |
| <i>Tabla 15</i> | |
| <i>Configuración para la prueba de dosis óptima con mucílago de Opuntia ficus-indica.....</i> | <i>115</i> |
| <i>Tabla 16</i> | |
| <i>Índice de floculación de Willcomb</i> | <i>117</i> |
| <i>Tabla 17</i> | |
| <i>Niveles de las variables.....</i> | <i>121</i> |
| <i>Tabla 18</i> | |
| <i>Niveles de las variables.....</i> | <i>124</i> |
| <i>Tabla 19</i> | |
| <i>Configuración de niveles y factores codificados</i> | <i>124</i> |
| <i>Tabla 20</i> | |
| <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en polvo a turbiedad alta (400 UNT).....</i> | <i>127</i> |
| <i>Tabla 21</i> | |
| <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en polvo a turbiedad media (280 UNT).....</i> | <i>129</i> |

| | |
|--|-------------|
| <i>Tabla 22</i> | |
| <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en polvo a turbiedad baja (60 UNT).....</i> | <i>132</i> |
| <i>Tabla 23</i> | |
| <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en líquido a turbiedad alta (400 UNT).....</i> | <i>138</i> |
| <i>Tabla 24</i> | |
| <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en líquido a turbiedad media (280 UNT).....</i> | <i>140</i> |
| <i>Tabla 25</i> | |
| <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en líquido a turbiedad baja (60 UNT).....</i> | <i>143</i> |
| <i>Tabla 26</i> | |
| <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante cloruro férrico a turbiedad alta (400 UNT).....</i> | <i>149</i> |
| <i>Tabla 27</i> | |
| <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante cloruro férrico a turbiedad alta (280 UNT).....</i> | <i>151</i> |
| <i>Tabla 28</i> | |
| <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante cloruro férrico a turbiedad alta (60 UNT).....</i> | <i>153</i> |
| <i>Tabla 29</i> | |
| <i>Hoja de cálculo ANOVA.....</i> | <i>159</i> |
| <i>Tabla 30</i> | <i>Hoja</i> |
| <i>de cálculo ANOVA by Ranks de Kruskal-Wallis.....</i> | <i>162</i> |
| <i>Tabla 31</i> | |
| <i>Prueba de mediana</i> | <i>164</i> |

Tabla 32

Resumen de resultados de turbiedad residual y porcentaje de remoción a tres diferentes coagulantes y tres niveles de turbiedad inicial 169

Tabla 33

Resultados de monitoreo de caudal, turbiedad y pH, en el ingreso de agua del canal de regadío 195

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1. Generación en el Perú de aguas residuales en el año 2012 y proyección al año 2024. ...</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 2. Descargas de Aguas Residuales Domésticas sin Tratamiento (m³) por departamento del Perú</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 3. Evolución de la cantidad de áreas verdes en el campus años 1945-2016.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 4. Compuestos adheridos a un coloide.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 5. Distribución de tamaños de las partículas en el agua</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 6. Diámetro de partículas coloidales en relación a una molécula, virus, bacteria y grosor de un cabello.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 7. Interfaces donde ocurren los intercambios y fenómenos de superficie.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Figura 8. Proceso de coagulación – floculación por el cual las partículas se aglutinan con uso de coagulante en pequeñas masas, con peso específico superior al del agua, llamadas flóculos.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Figura 9. Concentración de coloide, expresada como concentración de superficie</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 10. Modelo esquemático del proceso de coagulación</i> | <i>57</i> |
| <i>Figura 11. Interacción repulsiva debido a polímeros adsorbidos en la superficie de coloides.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 12. Esquema de la atracción por fuerza de Van der Waals.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figura 13. Fuerzas de atracción y repulsión Fuente: (Andía, 2000).....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figura 14. Doble capa de una partícula coloidal.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 15. Modelo para explicar la doble capa eléctrica</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 16. Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides mediante polímeros.</i> | <i>66</i> |

| | |
|---|------------|
| <i>Figura 17. Reestabilización de partículas.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 18. Proceso de coagulación de coloides por adsorción con sulfato de aluminio.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figura 19. Esquematzación de polímeros adsorbidos en la superficie de coloides</i> | <i>74</i> |
| <i>Figura 20. Cladodio y fruto de Opuntia ficus-indica a escala 1:4 y 1:1 respectivamente.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figura 21. Micrografías de mucílago donde se muestra su estructura porosa.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Figura 22. Micrografías de mucílago en estado de hidratación</i> | <i>92</i> |
| <i>Figura 23. Proceso de extracción de mucílago por maceración. Adaptación Quispe (2013).....</i> | <i>110</i> |
| <i>Figura 24. Proceso de extracción de mucilago en polvo. Adaptación Guardado y Hernández (2017)</i> | <i>111</i> |
| <i>Figura 25. Guía para estimar el tamaño del flóculo formado en el proceso de coagulación, según WRA (Vargas, 2004)</i> | <i>116</i> |
| <i>Figura 26. Gráfico que relaciona la gradiente de velocidad y las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con deflectores, tipo de rotor y vaso precipitado de 2 litros de tipo de componente circular (Vargas, 2004).....</i> | <i>118</i> |
| <i>Figura 27. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con Opuntia ficus- indica en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja de 60 UNT)</i> | <i>134</i> |
| <i>Figura 28. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con Opuntia ficus-indica en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>135</i> |
| <i>Figura 29. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con Opuntia ficus-indica en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media 280UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>135</i> |

| | |
|---|------------|
| <i>Figura 30. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con Opuntia ficus-indica en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>136</i> |
| <i>Figura 31. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con Opuntia ficus-indica en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>136</i> |
| <i>Figura 32. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con Opuntia ficus-indica en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>137</i> |
| <i>Figura 33. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con Opuntia ficus-indica líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>145</i> |
| <i>Figura 34. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con Opuntia ficus-indica líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>146</i> |
| <i>Figura 35. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con Opuntia ficus-indica líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>146</i> |
| <i>Figura 36. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con Opuntia ficus-indica líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>147</i> |
| <i>Figura 37. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con Opuntia ficus-indica líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>147</i> |
| <i>Figura 38. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con Opuntia ficus-indica líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>148</i> |

| | |
|---|------------|
| <i>Figura 39. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT).....</i> | <i>156</i> |
| <i>Figura 40. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)</i> | <i>156</i> |
| <i>Figura 41. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)</i> | <i>157</i> |
| <i>Figura 42. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT) ...</i> | <i>157</i> |
| <i>Figura 43. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)</i> | <i>158</i> |
| <i>Figura 44. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)</i> | <i>158</i> |
| <i>Figura 45. Efecto de la turbiedad residual (UNT) en los tres diferentes coagulantes.....</i> | <i>160</i> |
| <i>Figura 46. Regresión lineal.....</i> | <i>160</i> |
| <i>Figura 47. Gráfica de prueba de normalidad.....</i> | <i>161</i> |
| <i>Figura 48. Rangos de niveles más bajos de turbiedad residual alcanzados con los diferentes coagulantes.....</i> | <i>165</i> |
| <i>Figura 49. Porcentaje de remoción de turbiedad con tres coagulantes.....</i> | <i>166</i> |
| <i>Figura 50. Porcentaje de remoción de acuerdo a la turbiedad inicial (alta, media y baja) para los dos métodos de extracción de mucílago (en polvo y líquido por maceración).</i> | <i>167</i> |
| <i>Figura 51. Medición de parámetros de calidad de agua in-situ en el canal de riego</i> | <i>192</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Figura 52. Resultados de aceites y grasas.....</i> | <i>193</i> |
| <i>Figura 53. Resultados de DBO₅.....</i> | <i>193</i> |
| <i>Figura 54. Resultados de plomo total</i> | <i>194</i> |
| <i>Figura 55. Resultados de DQO</i> | <i>194</i> |
| <i>Figura 56. Proyección de población universitaria UPeU del año 2009 al 2025.....</i> | <i>198</i> |

ÍNDICE DE ANEXO

| | |
|--|-------------------|
| <i>Anexo 1. Informe del análisis de parámetros físicos, químicos y microbiológicos</i> | <i>188</i> |
| <i>Anexo 2. Análisis de caracterización de calidad de agua del canal de riego.....</i> | <i>192</i> |
| <i>Anexo 3. Medición de caudal.....</i> | <i>195</i> |
| <i>Anexo 4. Población universitaria</i> | <i>197</i> |
| <i>Anexo 5. Áreas verdes del campus UPeU</i> | <i>199</i> |
| <i>Anexo 6. Proporción de acuerdo al uso de áreas verdes.....</i> | <i>201</i> |
| <i>Anexo 7. Áreas verdes por persona en el campus universitario año 2012-2016.....</i> | <i>202</i> |
| <i>Anexo 8. Fuente de riego de áreas verdes a través de canales.....</i> | <i>203</i> |
| <i>Anexo 9. Ficha técnica de Cloruro férrico.....</i> | <i>204</i> |
| <i>Anexo 10. Procedimiento para la extracción de mucílago de la Opuntia ficus-indica.....</i> | <i>212</i> |
| <i>Anexo 11. Procedimiento de tratabilidad con la Prueba de Jarras</i> | <i>217</i> |
| <i>Anexo 12. Gráfico que relaciona la gradiente de velocidad y las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con deflectores, tipo de rotor y vaso precipitado de 2 litros de tipo de componente circular.</i> | <i>228</i> |
| <i>Anexo 13. Base de datos de las pruebas de Jarras en laboratorio</i> | <i>229</i> |
| <i>Anexo 14. Matriz de operalización</i> | <i>230</i> |

Símbolos usados

E.P.: Escuela Profesional

RPM: Revoluciones por minuto

S⁻¹: Por segundo

ONU: Organización de las Naciones Unidas

s. f.: Sin fecha

UNT: Unidad nefelométrica de turbidez

pH: Potencial de hidrógeno

mg/ml: Miligramos por mililitro

p-value: Nivel de significancia

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación

DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

MINAM: Ministerio de ambiente

OMS: Organización Mundial de la Salud

EPS: Empresas prestadoras de servicios de saneamiento

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales

H₀: Hipótesis nula

H_a: Hipótesis alterna

µm: Micra

RESUMEN

La contaminación del canal de riego de las zonas agrícolas periurbanas de los valles del Río Rímac y Chillón, Moscoso-Cavallini (2011) afirma que “representa un alto riesgo de diseminación de enfermedades infecciosas y entéricas como la fiebre amarilla, hepatitis, cólera o parálisis infantil y una gran variedad de desórdenes intestinales, disentería, tuberculosis, etc. Andrade & Tipán (2016) por huéspedes intermedios como las bacterias coliformes y los estreptococos” (p.45); siendo que en el Campus de la UPeU que hace uso del agua para riego de áreas verdes. Es por ello que uno de los parámetros más importantes de calidad de agua menciona Bravo & Gutiérrez (2015) es “la turbiedad que cobra importancia por ser un medio protector que adsorben microorganismos patógenos, sustancias químicas como metales pesados, compuestos orgánicos, etc.” (p.14).

Es por ello que se pretende evaluar la remoción de turbiedad de agua del canal de riego mediante tratamiento químico por coagulación-floculación con dos métodos de extracción de coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica* a escala laboratorio por el proceso de simulación con equipo de Prueba de jarras; la metodología que inicia con la técnica de extracción del coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica*, a continuación con el equipo de prueba de jarras y aplicación del coagulante natural que se contrastará con la eficiencia del coagulante químico de cloruro férrico. Como resultado el diseño estadístico kruskal wallis ha permitido determinar si los factores inciden en la variable de estudio y poder establecer si las condiciones han sido óptimas. En base a esto el análisis del diseño experimental

concluye que el factor más influyente es el tipo de coagulante a usar y de acuerdo a los niveles de turbidez residual alcanzados se podrá sustituir el uso de un coagulante químico con mucilago de *Opuntia ficus-indica* en polvo en el tratamiento del agua del canal de riego; aplicando el método de extracción por maceración con agua destilada 1:1 licuado y secado a 120°C por 6 horas y otras 6 h a 60°C para luego tritarlo a un diámetro menor a 0.5mm, su eficiencia ha sido probado través de un análisis de Jarras, a condiciones de temperatura de 26°C, pH rango de 7.3-7.5, mezcla de coagulación de 100 RPM por 1 min, velocidad de floculación de 40 UNT por 20 min y sedimentación por 10 min en turbiedad inicial alta (400 UNT) obteniendo valores promedios de 12.4 UNT con porcentajes de remoción de 96.9% con dosis 4mg/L al 5%; a turbiedad inicial media (280 UNT) 95% de remoción con turbidez residual de 14.1 UNT con dosis 3 mg/L al 5% y para turbidez inicial baja (60 UNT) la remoción es de 82.1% (10.8 UNT) con dosis de 20 mg/L; y en menor escala de eficiencia el mucilago con método de extracción en líquido alcanzó un 88.3% (47 UNT turbidez residual) en turbiedad inicial alta, 89.6% (29 UNT) turbiedad inicial media y 81.2 % (11.2 UNT) turbiedad inicial baja.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica*, mucílago, cloruro férrico, turbidez, coagulación, floculación.

SUMMARY

The contamination of the irrigation channel of the agricultural zones of the valleys of the Rímac and Chillón River, Moscoso-Cavallini (2011) affirms that "it represents a high risk of infectious and enteric diseases such as yellow fever, hepatitis, cholera or paralysis" Andrade & Tipán (2016) by intermediaries such as coliform bacteria and streptococci "(p.45); being that in the UPeU Campus that makes use of water for the irrigation of green areas. It is therefore one of the most important parameters that the water Bravo and Gutiérrez (2015) is "the turbidity that gains importance as the protective medium that adsorbs pathogenic microorganisms, chemical substances such as heavy metals, organic compounds, etc." (p. .14).

That is why it is an operation to remove the turbidity of the canal water by using a chemical by coagulation-flocculation with two methods of extraction of mucus coagulant from *Opuntia ficus-indica* a laboratory escalation by the simulation process with the Pitcher Test equipment; the methodology that begins with the *Opuntia ficus-indica* skin coagulant extraction technique, then with the jar test equipment and the application of natural coagulant that is compared with the efficiency of the ferric chloride chemical coagulant. As a result, the Kruskal wallis statistical design has allowed to determine the factors that affect the study variable and to establish the optimal conditions. Based on this, the experimental design analysis concludes that the most influential factor is the type of coagulant, the use and agreement, the levels of turbidity, and the use of a chemical coagulant with

mucilage of *Opuntia ficus-indica* powder in the water treatment of the irrigation canal; applying the extraction method by maceration with distilled water1: 1 liquefied and dried at 120 ° C for 6 hours and another 6 hours at 60 ° C and then crushing it to a diameter less than 0.5mm, its efficiency has been proven through an analysis of Jars, at temperature conditions of 26 ° C, pH range of 7.3-7.5, coagulation mixture of 100 RPM for 1 min, flocculation speed of 40 UNT for 20 min and sedimentation for 10 min in high initial turbidity (400 UNT) obtaining average values of 12.4 UNT with removal percentages of 96.9% with a dose of 4mg / L at 5%; a mean initial turbidity (280 NTU) 95% removal with residual turbidity of 14.1 NTU at a dose of 3 mg / L at 5% and for low initial turbidity (60 NTU) the removal is 82.1% (10.8 NTU) at a dose of 20 mg / L; and on a smaller scale of efficiency, the mucilage with liquid extraction method reached 88.3% (47 NTU residual turbidity) at high initial turbidity, 89.6% (29 NTU) mean initial turbidity and 81.2% (11.2 NTU) low initial turbidity.

Key words: *Opuntia ficus-indica*, mucilage, ferric chloride, turbidity, coagulation, flocculation.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La escasez del agua dulce cada vez es mayor; de acuerdo al Informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2007), se calcula que en el mundo, sólo el 2,5% es agua dulce, de ésta los ríos representan el 1,6% y únicamente el 0,4% se encuentra en otras fuentes superficiales y la atmósfera; siendo los principales suministros finitos para agua potable y riego (Gabriela & Jaramillo, 2015); esta problemática se agrava debido al crecimiento demográfico exponencial y la expansión de las ciudades que provocan una mayor demanda de recursos básicos alimentarios, de territorio, además de áreas verdes, donde la gestión de recursos hídricos es errática e incierta; siendo que, de todo el mundo, 780 millones de personas carecen de acceso al agua potable, y 2500 millones a sistemas de saneamiento apropiados (Organización de las Naciones Unidas, 2017), todo ello tiene como consecuencia la contaminación relacionada a los diferentes usos de los recursos hídricos, producida por las fábricas, las ciudades y las tierras agrícolas, se calcula que el 59% del consumo total de agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico; no obstante en el año 2025, el consumo de agua destinada a uso industrial alcanzará los 1.170 km³ / año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km³/año, según se constata en el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo (PNUD) de los recursos hídricos del mundo. Mientras que, en la ciudad de Lima con más de 10 millones de habitantes, la demanda de agua del principal

abastecedor el Río Rímac para uso poblacional es de 51.1% (12.4 m³/s), para uso industrial es de 33.4% (9.5 m³/s), para uso agrícola incluyendo áreas verdes de 14.7% (6.3 m³/s), para uso minero de 0.7% (0.2 m³/s) y para uso pecuario 0.1% (0.03 m³/s) (Carranza & Calla Llontop, 2010).

El sector productor no sólo es el que más gasta, también es el que más contamina, más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles (Fernández et al., s. f.), a los vertimientos se suman los contaminantes atmosféricos emitidos, estando relacionada a través del ciclo hidrológico, donde el agua pasa por la atmósfera absorbiendo gases y vapores como N₂, CO₂, partículas de polvo, sales, etc., luego escurre en la superficie terrestre adquiriendo elementos compuestos del suelo, influenciada por la actividad humana; el agua no tiene la capacidad suficiente para eliminar todas las sustancias y contaminantes que se vierten en ésta; concurriendo de esta manera, la mala calidad en sus características físicas, químicas y biológicas que agravan la problemática de escasez que ha dado lugar al reuso creciente de aguas residuales tratadas para la agricultura y áreas verdes; aunque si bien puede aportar beneficios como el de nutrientes, su uso sin tratamiento y no controlado está relacionado con impactos severos sobre la salud humana (ONU, 2017).

Como consecuencia del mal manejo uso de aguas contaminadas son las enfermedades diarreicas que son la segunda mayor causa de muerte cada año de 525 000 de niños menores de cinco años; además de ser una de las principales causas de malnutrición; que por lo general son consecuencia de la exposición a alimentos o agua contaminados; prácticamente la décima parte de la carga global de enfermedades podría prevenirse mejorando el abastecimiento de agua, el saneamiento, la higiene y la gestión de los recursos hídricos; es por ello que se requiere un tratamiento para ser consumida o reutilizada; para ésta problemática es necesario optimizar la gestión de los recursos hídricos para reducir la carga de enfermedades transmitidas por vectores y asegurar la salubridad (Organización Mundial de la Salud, 2012).

El agua es tanto un derecho como una responsabilidad, y tiene valor económico, social y ambiental; cada ciudadano, cada empresa, ha de tomar conciencia de que el agua dulce de calidad es un recurso natural, cada vez más escaso tanto a nivel superficial como subterráneo, necesario no sólo para el desarrollo económico, sino imprescindible como soporte de cualquier forma de vida en la naturaleza; para ello es necesario desarrollar un adecuado tratamiento de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos que contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas; sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria (Fernández et al., s. f.). Si

se incrementa la eficacia de los procesos de producción y se adoptan tecnologías y procedimientos limpios, reduciendo al mínimo, e incluso evitando, los deshechos.

La calidad del agua de abastecimiento para riego de las áreas verdes en las zonas agrícolas periurbanas de los valles del Río Rímac y Chillón es deficiente por la presencia de minería informal en las alturas de San Mateo provincia de Huarochirí; y efluentes con residuos sólidos de poblaciones que se van asentando a los alrededores, etc.; además no hay gestión adecuada para el monitoreo de la calidad y uso eficiente del recurso. (Moscoso-Cavallini, 2011).

Según Bravo & Gutiérrez (2015) se entiende por reúso del agua al proceso de volver a utilizar directa o indirectamente, las aguas resultantes de actividades antropogénicas; el reúso suele ser en su mayoría indirecto, en la medida que una gran cantidad de los desagües tratados y no tratados son descargados a cuerpos receptores, tales como ríos, mares o lagos, de los cuales se capta el agua para el uso agrícola, áreas verdes, u otra actividad que las demande; mientras que, el reúso directo es cuando las aguas residuales tratadas o sin tratar son utilizadas directamente en el riego agrícola o de áreas verdes; este segundo tipo no es considerado por la legislación como reúso, y sin embargo es el que más preocupa por sus graves impactos en la salud y el ambiente cuando no existe un tratamiento previo adecuado.

Ante ello, Bravo y Gutiérrez (2015) precisan que una vez que es captada el agua, el tratamiento convencional contempla los procesos unitarios de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, empleados en función de

factores técnicos, normativos y económicos con el propósito de asegurar un agua libre de microorganismos y compuestos causantes de efectos fisiológicos adversos (Gabriela y Jaramillo, 2015); para tal efecto Morejón (2017) puntualiza que los coagulantes metálicos son los más utilizados siendo los representativos el sulfato de aluminio, sulfato férrico, cloruro férrico y el aluminato de sodio; de manera si bien los reactivos químicos son eficientes en la remoción de turbiedad, presentan problemática en su uso, de las cuales son de acuerdo a (Guzmán, Villabona, Tejada, & García, 2013), ser muy corrosivo, lo que dificulta su manejo y almacenamiento; alto costo de importación de estos químicos para las comunidades en vías de desarrollo; además en el proceso de clarificación pueden causar un color y precipitación en el agua tratada, tienen el inconveniente de ser muy sensibles a un cambio de pH, en el caso de alcalinidad natural lleva a la reducción del pH; y muestra baja eficacia de coagulación en aguas frías; en el caso si éste no está dentro del intervalo adecuado la clarificación es pobre y pueden solubilizar hierro (Fe) ó aluminio (Al) y generar detenciones Guzmán *et al.* (2013), como la evidencia que relaciona a los coagulantes, a base de aluminio, con el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer en los seres humanos, debido a la presencia de aluminio residual en el agua tratada (Samame, 2016).

Por otro lado Mosquera (2014) afirma que a lo largo del proceso se produce grandes volúmenes de lodo al tener una pobre capacidad de deshidratación (90 % agua) y un potencial riesgo tóxico (40 % a 50 % de aluminio sin reaccionar) que complican la disposición final de lodos, afectando la calidad y usos potenciales;

siendo otro es el caso el uso del alumbre potásico ha levantado numerosas inquietudes que incluyen impacto eco toxicológico cuando es introducido en el ambiente como post-tratamiento de lodos, e impactos en la salud humana como resultado del consumo del agua tratada pudiendo aumentar la ingesta en 4mg de aluminio sin solubilizar al día e incidir en la salud humana, debido a la gran biodisponibilidad del aluminio para ser absorbido por el intestino (Gabriela & Jaramillo, 2015); la ingesta de altas dosis de aluminio está asociada al desarrollo de diversos procesos neurofisiológicos responsables de la degeneración del Alzheimer así como, afecciones en el hígado, cerebro, corazón, etc. (ONU, 2017).

En concordancia con esta problemática, surge el interés por el estudio de nuevos materiales respetuosos con el ambiente y eficientes en el proceso de coagulación y floculación; provenientes de diversas especies vegetales taninos, pectinas y almidones, que por a su naturaleza biodegradable, abundantes fuentes de obtención, precio relativamente bajo, sugieren una eficiencia similar a los coagulantes químicos, reducción del riesgo de contaminación ambiental y eliminación del riesgo tóxico para el ser humano; a partir de entonces se han desarrollado estudios sobre compuestos orgánicos como la moringa (*Moringa oleífera*), Tuna (*Opuntia ficus-indica*) y banana (*Musa paradisiaca*), etc. (Gabriela & Jaramillo, 2015).

Morejón (2017) desarrolló una investigación con el propósito de comprobar la efectividad de una suspensión de la cactácea *Opuntia ficus-indica* como coagulante en la clarificación de aguas sintéticas con alta turbidez. Dicho estudio

se realizó a escala laboratorio preparando aguas sintéticas a valores de turbidez inicial de 100, 120, 140, 160, 180 y 200 UNT, las cuales se caracterizaron fisicoquímicamente, resultando como dosis óptimas 450, 450, 350, 350, 450 y 350 mg/L, respectivamente. Los resultados revelaron porcentajes de remoción de turbidez entre 91,39 y 96,02%. El color tuvo una remoción entre 95,63 y 100% después del filtrado. El pH fluctuó entre 6,77 y 7,23 unidades pH y la alcalinidad presento variaciones mínimas después de la aplicación del coagulante. Los parámetros evaluados se ubicaron dentro de los rangos exigidos por las normas sanitarias de calidad de agua potable de Venezuela.

Marieli et. Al. (2011), investigaron la efectividad de un coagulante extraído de la *Opuntia ficus-indica* *Opuntia wentiana* en la clarificación del agua. Para ello, se recolectaron muestras de agua cruda natural en la planta de tratamiento Pueblo Viejo (Estado Zulia, Venezuela) y a partir de éstas se prepararon aguas diluidas con turbiedades iniciales de 100, 120, 160, 180 y 200 UNT. Estas aguas fueron tratadas con diferentes dosis (300, 400, 500, 600 y 700 ppm) del coagulante natural. Se evaluaron los parámetros pH, turbidez, color y alcalinidad en las aguas crudas y en las tratadas. Después de aplicar las dosis óptimas del coagulante (600 y 700 ppm), los porcentajes de remoción de turbidez oscilaron entre 85,25 y 94,84% antes de la simulación de la filtración y entre 91,82 y 98,34% luego de ello. Estos resultados demostraron la efectividad del coagulante extraído de *Opuntia wentiana* en la clarificación del agua (Marieli, García, Mendoza, González, & Fuentes, 2011).

Antillón, Camareno, & Bustos (2012) desarrollaron un estudio con la finalidad de evaluar la eficiencia del cactus de la *Opuntia cochenillifera* para remover el color en agua del río Humo y agua artificial para consumo humano; en el que su efectividad se comparó con el coagulante sulfato de aluminio y un floculante catiónico. En la caracterización de la calidad del agua fluvial presentó un alto color, alto porcentaje de oxígeno disuelto, baja en turbidez, alcalinidad y dureza. La metodología para la elaboración del coagulante se pelaron las hojas, se mezcló con agua destilada y aplicó agitación constante por una hora, luego se filtró en tela y finalmente se desecó a 60°C hasta peso constante y lograr determinar la humedad del compuesto y estimar la concentración de la disolución que fue de 22.5 mg/ml. Como resultados la especie *Opuntia ficus-indica* mostró una eficiencia de remoción de color del 94% en agua artificial, cuando se aplicó como tratamiento único con dosis de 45 mg/l, poco superior al tratamiento convencional con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a dosis de 20 mg/l y coagulante catiónico con 2 mg/l con una remoción del 89%; mientras que en el caso de agua artificial, la tuna como floculante reveló una remoción de color del 92% y una DQO residual de 31,5 mg/l aplicando la misma dosis, pero con 7 mg/l de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. El autor adicionalmente recomienda extraer los principios activos de productos naturales para reducir la carga orgánica del agua tratada para evitar la formación de elementos adicionales que requieran otro proceso de tratamiento.

Choque (2018) explica su investigación que tuvo como objetivo evaluar y optimizar la capacidad floculante de dos especies de Cactáceas *Neoraimondia*

arequipensis (Ulluquite) y *Opuntia ficus indica* (Tuna) en el tratamiento de agua residual artificial, donde se emplearon dosis del 1%, 2% y 3% de coagulante de las dos especies de Cactáceas extraídas con tres solventes NaCl, Etanol, 0.25M y agua; logrando mayor rendimiento de extracción la variedad *Opuntia ficus-indica* 0.6546 ± 0.0246 %, el pH de los coagulantes tiene tendencia ácida al extraer con etanol, la temperatura de gelatinización se encuentra por encima de 70°C, el contenido de proteínas es menor a 0.8986 ± 0.007 mg de Albúmina/mL de coagulante al 1%, el contenido de azúcares son menores a 0.3160 ± 0.0167 mg de sacarosa/l de coagulante al 1%, y la densidad aparente fue menor para la variedad Ulluquite, observándose un incremento significativo ($p\text{-value} < 0.05$) para la capacidad clarificante y el porcentaje de remoción, con el aumento de dosis de coagulante. Los parámetros fisicoquímicos del agua tratada como el pH se incrementaron ligeramente de 6.61 del agua sin tratar a 7.58, mientras que la dureza y la alcalinidad no muestran diferencia significativa ($p\text{-value} > 0.05$), la DBO del agua con coagulante se incrementó con el porcentaje de aplicación. Finalmente se optimizó la capacidad floculante de los coagulantes naturales en el agua residual artificial, a través del porcentaje de remoción lográndose 92.419% para la variedad Ulluquite y 98.988% para la variedad Tuna, para dosis de 0.246% y 0.754% de coagulante respectivamente

Por consiguiente, se propone evaluar la remoción de turbiedad de agua de canal de riego mediante tratamiento químico por coagulación-floculación con dos

métodos de extracción de coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica* a escala laboratorio.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar la remoción de turbiedad de agua de canal de riego mediante tratamiento químico por coagulación-floculación con dos métodos de extracción de coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica* a escala laboratorio.

1.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar las pruebas de tratabilidad a escala piloto del método de extracción del coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica*
- Determinar las condiciones óptimas de dosis y concentración para el funcionamiento del sistema con el coagulante de polímero natural.
- Evaluar el sistema de tratamiento físico-químico a través de la eficiencia de remoción de turbiedad con un análisis estadístico de kruskal wallis.

2. Justificación de la investigación

La FAO proyecta que para el 2050 la demanda de agua podría ser más del 40% de los recursos que están disponibles, por ello los gobiernos conscientes de la vulnerabilidad de la escasez de agua en proporción a éste crecimiento desmesurado demográfico y nuevos patrones de consumo ha ideado formas como a conciencia, fomento de agricultura eficiente, y el reúso de agua en el que si generando mayor investigación acerca de desarrollar infraestructuras más

eficientes, éstas serán rentables siendo más accesible la obtención del metro cúbico de agua regenerada; a todo esto cabe la importancia derivada de la reutilización de las aguas contaminadas es obtener agua segura y la posibilidad de reservar el agua de mejor calidad para los usos más rígidos tales como la elaboración de agua potable (FAO, 2018).

Como parte del desarrollo de la propuesta de proyecto en el año 2017 por la Escuela de Ingeniería Ambiental titulado “Implementación del circuito Ecoturístico de la Laguna Mansión y el diseño de una planta de tratamiento de las aguas residuales para el riego de áreas verdes en la Universidad Peruana Unión”, en el que en el diseño del sistema de tratamiento de agua dirigido por el Ing. Juan Moreno Oscanoa, y como actividades de diagnóstico se han llevado a cabo el reconocimiento de la zona, tipos de abastecimiento de agua de riego, rutas de acceso, uso de suelo, problemática por fuentes puntuales de contaminación por poblaciones aledañas, análisis fisicoquímico y biológico del agua; de éste último resultó que los parámetros de Coliformes Termotolerantes, Coliformes totales, aceites y grasas, DBO_5 , DQO, y plomo total superan los Estándares de Calidad Ambiental – agua, Clase III Agua para Riego de Vegetales y Bebida de Animales. Para lo que el sistema estaría compuesto por los procesos de tratamiento preliminar: cámara de rejillas y desarenadores para la remoción de sólidos flotantes, arenas y gravas, y/o procesos de homogenización de caudales; tratamiento fisicoquímico: procesos de coagulación y/o floculación, decantación, filtración, desinfección; disposición de lodos constituido por procesos de espesamiento con

secado de los lodos generados; y por último el reservorio de almacenamiento cuya finalidad será regular la producción de agua frente a la demanda del agua de riego en el campus de la UPeU.

El presente trabajo de investigación propone la utilización de un coagulante natural extraído del mucílago de *Opuntia ficus-indica*, como una alternativa para sustituir el empleo de cloruro férrico en el proceso fisicoquímico de coagulación – floculación, orientada a mejorar la calidad del agua del canal de regadío contaminada a lo largo de su trayectoria por fuentes de agua urbanas para el fin de uso de riego de áreas verdes del campus universitario; además pretende contribuir con el estudio de alternativas sostenibles eficientes en el proceso de tratamiento químico, respetuosas con el ambiente por su naturaleza biodegradable, con abundantes fuentes de obtención, precio relativamente bajo, reducción del riesgo de contaminación ambiental y eliminación del riesgo tóxico para el ser humano; por consiguiente mejorar la situación sanitaria y condiciones de bienestar de la población universitaria afectada por áreas verdes contaminada, complementariamente es conveniente para un manejo ambiental económico, seguro y eficiente en el uso de agua tratada al minimizar el impacto ambiental derivado del uso de coagulantes químicos convencionales como cloruro férrico, entre otros; cuyo uso trae desventajas asociadas a altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo y el hecho de que afectan el pH del agua tratada. Adicionalmente con el tratamiento del agua del canal que se usa para riego se estará cumpliendo la norma del EPA (nivel de turbiedad < 30 UNT para este fin).

Por lo expuesto anteriormente, esta investigación es un aporte importante en el campo científico - académico - social y para la comunidad por entregar una alternativa asequible que constituye un referente de iniciativa local que permitió desarrollar un estudio de campo de manera experimental.

Silva (2017) desarrolló una metodología de extracción de mucílago para la aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias; que consistió en trozarlas, licuado con agua destilada en proporción 1:1, se embebe con agua purificada en relación de 3:1 – 4:1 a temperatura de 80°C por un tiempo de 2-4 horas, luego se filtró y centrifugado a 3000 RPM por 20 min, a continuación se concentró la muestra a baño maría a 75°C por 12 horas, enseguida se insolubiliza el polímero por precipitación adicionando alcohol etílico en proporción de 3:1 (alcohol: mucílago), se hierve a 75 °C y se filtra; pasa por la estufa para secado a 70°C y finalmente molienda. Se realizó pruebas para remoción de turbidez en el agua para ello se pesa 0.25 g de mucilago seco, se coloca en un vaso precipitado con 10 mL de agua destilada, esta solución se agregará posteriormente en un volumen de 1.5 mL y 2.5 mL para la concentración de mucilago a usar en la clarificación de aguas turbias obteniendo como resultados para cada valor de turbidez inicial de 1000 UNT y 500 UNT porcentajes de remoción 78.7 y 88.9 % respectivamente. Por eso para favorecer la remoción porcentual de turbidez se realizaron pruebas adicionales, utilizando como coagulante catiónico al Sulfato de Aluminio complementado con el mucilago de tuna reduciendo los valores de turbidez desde 1000 UNT hasta 6.15 UNT.

Carhuamaca (2013) desarrolló una investigación con el objetivo de tratar efluentes de lactosuero con mucílago de nopal en el que se evalúa la influencia de concentraciones de 0, 1, 3 y 5 % p/v de lactosuero sobre parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), turbidez, acidez, pH y conductividad. Para la significación estadística se aplicó la prueba de comparación múltiple de Duncan; a un nivel de confianza de 5 %. Se concluyó que el mejor tratamiento es a una concentración al 3 % y 30 mL de mucílago nopal por litro de lactosuero resultando 84,54 % de reducción de lactosa, 11,20 unidades nefelométricas de turbidez (UNT) y 80 mg/L de DBO valor permitido para efluentes, mientras que la conductividad no presentó diferencia significativa.

Baltodano & Millones (2013) con el objeto de reducir costo de operación en el tratamiento de relave del procesamiento de minerales de la concentradora de Chota-Motil - La Libertad estudiaron la concentración del mucílago de vegetales sobre la velocidad de floculación del relave, para lo que se estableció tres rangos 100, 200 y 300 rpm de velocidad en la prueba de jarras y también se varió la dosificación del floculante de 3ml, 4ml, 5ml y 6ml para tener la mejora sedimentación, en tiempos de 5,10, 15, 20, 30, 40 y 50 min, determinando así la turbidez residual. Se concluye que el mejor tratamiento es en concentración de mucílago de 4ml con 200 RPM con 5 minutos.

Estudios de Méndez, C., Flores, J., Rangel, J., & Yañez, L. (2012) con el desarrollo del biopolímero de mucílago de nopal *Opuntia ficus-indica* lograron un rendimiento de extracción de mucílago entre el 2.5 y el 7% en base húmeda, la

precipitación la realizaron con acetona, y encontraron que el mucílago es eficaz para la remoción de metales pesados mediante coagulación, a un pH de 6.5, lograron una remoción del 83% plomo, 80% para hierro y 15% para zinc. (Méndez, Flores, Rangel, & Yañez, 2012)

. Modificación de biopolímero extraído de nopal (*Opuntia ficus indica*) y su aplicación para la remoción de metales pesados en agua. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C., (San Luis Potosí).

Ante la problemática de uso de coagulantes como el sulfato de aluminio; sustancia que cumple eficientemente su función, pero es bio-acumulada por los humanos afectando la salud. Fuentes, Molina, & Ariza (2016) evaluaron la eficiencia de cuatro coagulantes naturales moringa oleífera, cactus opuntia, algas marinas y Almidón, para la clarificación de las aguas de consumo humano, de acuerdo a la metodología se desarrolla a escala piloto en sistemas batch y continuos; para ello las biomásas fueron analizadas con y sin pre-tratamientos químicos (Ca(OH)_2 , CaCl_2 , NaOH y NaCl), analizando parámetros dependientes y fueron color, turbiedad, OD, ST, conductividad DQO y pH. Como resultado se obtuvo que la mayor remoción es con pre-tratamientos excepto el cactus; encontrándose 88.26% para moringa usando Ca(OH)_2 , 79.73 % para almidón con NaOH ; 81.14 % para algas con CaCl_2 y 98.41 % para cactus; en cuanto a valores de pH en ningún caso se vio alteración sobre el comportamiento a lo largo del proceso, mientras que el sulfato de aluminio disminuye el valor del pH. (Fuentes, Molina, & Ariza, 2016)

Choque et al. (2018) desarrolló una investigación comparando la efectividad en el tratamiento de agua con tres variedades de cactáceas *Echinopsis pachanoi*, *Neoraimondia arequipensis* y *Opuntia ficus*; donde la metodología de extracción consistió en cortar en trozos, licuar con agua destilada en una relación 1:1, molienda fina, tamizado en una malla de 1000 micras, a fin de eliminar la fibra, enseguida se realizó una extracción líquido - líquido del zumo filtrado, con un medio solvente en relación 1 de zumo: 2 de solvente siendo estas etanol al 96%, NaCl 0.25M o agua; consecutivamente se realizaron tantos cambios de solvente como sea necesario hasta la eliminación del color, en seguida el precipitado se secó a temperatura ambiente, se molió finamente y tamizó en una malla de 300 micras, obteniéndose un polvo fino y cristalizado de coagulante. Se aplicaron dosis del 1%, 2% y 3% de coagulante de las tres variedades de Cactáceas extraídas con los tres solventes al agua residual artificial; en el que se obtuvieron como resultados que el parámetro fisicoquímico del agua tratada como el pH se incrementaron ligeramente de 6.61 del agua sin tratar a 7.58; la actividad floculante del coagulante *Opuntia ficus* fue mayor en 46.475% con solvente etanol y porcentaje de remoción 99.147% con dosis óptimas de *Opuntia ficus* en el rango de 10 a 20 mg/l que remueven entre 80 a 90% de sólidos.

3. Presuposición filosófica

Como parte de la creación, en Génesis 2:15, menciona que Dios creó todo y lo entregó al ser humano para que lo administrara y siento el deber del cuidado de los seres vivos como parte del rol de Dios nos ha encomendado, la contaminación no solo afecta y modifica la naturaleza, sino también a los hombres, crea sufrimiento en los animales que si bien Dios los sometió a carecen de razón y espiritualidad, el hombre las posee, pero esta superioridad no les daba a los humanos licencia para ejercer autoridad sobre los animales a su antojo, sino de velar sus cuidados. La contaminación de los recursos hídricos conduce a problemas en el medio ambiente, así como en la salud del ser, somos parte de un sistema que esta interrelacionado. Como investigador el aprendizaje está en los principios básicos con las que fueron creados, las respuestas de funcionamiento dan lugar al entendimiento del poder y amor de Dios brinda a su creación. El Señor quiere que el ser humano viva en un ambiente saludable y que sea mayordomo de todo lo que Dios mismo hizo, esto también incluye los recursos naturales como el agua de los ríos. Por tal motivo el ser humano debe cuidar el ambiente donde vive para asegurar el desarrollo sostenible de las generaciones futuras. Al analizar la problemática de la quebrada Simuy, y como profesional de Ingeniería Ambiental con la iniciativa de servir a las personas para que tengan un espacio de recreación seguro y saludable para quienes acuden a este lugar, asimismo para preservar las especies de flora y fauna que habitan en este cuerpo de agua, se desarrolla la presente investigación con el objetivo de conocer la calidad del agua de la quebrada Simuy.

Capítulo 2

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco legal

2.1.1. Constitución Política del Perú

En el Artículo 67° de la Constitución se aclara el enfoque en cuanto a recursos hídricos donde define que “El estado determina la política nacional del ambiente promueve el uso sostenible de sus recursos”.

En cuanto al uso sostenible del agua está enmarcado a una adecuada gestión de los recursos hídricos que necesita de un enfoque integrado para el desarrollo económico, social y de protección de ecosistemas; para satisfacer las necesidades de generaciones presentes sin comprometer la disponibilidad de recursos de las generaciones futuras tomando el conocimiento científico como complemento para esta gestión.

2.1.2. Reglamento D.S. Nº 001-2010-AG de ley de recursos hídricos Ley N° 29338

En el Artículo 2° del Reglamento menciona que “El agua es un recurso natural renovable, vulnerable, indispensable para la vida, insumo fundamental para las actividades humanas, estratégica para el desarrollo sostenible del país, el mantenimiento de los sistemas y ciclos naturales que la sustentan y la seguridad de la Nación”, además se promueve el reúso y recirculación de aguas residuales

tratadas con el fin de ser más accesible a otros usos menos demandantes en control de calidad.

Además, en el Artículo 150° se determinan criterios para evaluar la calidad del agua para reúso de aguas residuales tratadas en el que se evalúa de acuerdo al uso al que se destine y establezca el sector adecuado o, en su defecto, las guías correspondientes de la Organización Mundial de la Salud.

2.1.3. Estándares de calidad ambiental para el agua

Los Estándares de calidad ambiental (ECA) aprobado con Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, determinan el nivel de calidad en parámetros físicos, químicos y biológicos del agua como cuerpo receptor para demostrar que no constituye riesgo potencial para la salud del ser humano ni el ambiente, y siendo el caso contrario permiten adoptar medidas de prevención y control de la calidad del agua o medidas correctivas ante el incumplimiento de los ECA. La calidad del agua son las condiciones mínimas que debe poseer para el uso en una actividad específica, aquella que cumple con los requisitos microbiológicos, organolépticos, físicos, químicos y radioactivos que establecen las normas sanitarias de calidad de agua potable y que se considera apta para el consumo humano (Morejón, 2017a).

Cada cuerpo de agua está clasificado de acuerdo al uso y conservación consignada con el fin de mantener la calidad que se quiere mantener o a la que se quiere llegar. Para fines de la investigación se desarrollará siguiendo lineamiento de la Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales; así como la Subcategoría D1: Riego de vegetales; que entiéndase como aquellas aguas

utilizadas para el riego de los cultivos vegetales, las cuales, dependiendo de factores como el tipo de riego empleado en los cultivos, la clase de consumo utilizado (crudo o cocido) y los posibles procesos industriales o de transformación a los que puedan ser sometidos los productos agrícolas:

- Agua para riego no restringido; la clasificación para este tipo permite el uso en riego de cultivos alimenticios que se consumen crudos (Ej.: hortalizas, plantas frutales de tallo bajo o similares); cultivos de árboles o arbustos frutales con sistema de riego por aspersión, donde el fruto o partes comestibles entran en contacto directo con el agua de riego, aun cuando estos sean de tallo alto; parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales; o cualquier otro tipo de cultivo.
- Agua para riego restringido; donde el agua permite el riego de cultivos alimenticios que se consumen cocidos (Ej.: habas); cultivos de tallo alto en los que el agua de riego no entra en contacto con el fruto (Ej.: árboles frutales); cultivos a ser procesados, envasados y/o industrializados (Ej.: trigo, arroz, avena y quinua); cultivos industriales no comestibles (Ej.: algodón), y; cultivos forestales, forrajes, pastos o similares (Ej.: maíz forrajero y alfalfa).

2.1.4. Estándares de acuerdo a la OMS para reúso de agua residual tratada

Por lo general, las normas o directrices sobre la calidad de las aguas residuales pretenden emplearlas para riego de cultivos sin restricciones, incluso para cultivos de legumbres y verduras para ensaladas que se consumen crudas, contienen reglas explícitas como indicar el número máximo de coliformes y

requisitos mínimos de tratamiento según la clase de cultivo o especie que se debe regar. Mientras que, las guías de la OMS del 2015 definen la calidad del agua residual a reutilizar en función de la evaluación del riesgo para la salud de los que participan en la cadena del reúso: el consumidor de los productos, los agricultores y la población aledaña. Y las clasifica a los cultivos en dos categorías siguientes (OMS, 2015):

Categoría A:

Esta categoría abarca cultivos alimenticios que se consumen crudos como lechuga, espinaca, etc.; frutas regadas por aspersión siendo aún con tallo alto; césped de campos deportivos y parques públicos; y cultivos acuícolas de peces o crustáceos.

Categoría B:

En esta categoría se enmarca lo siguiente:

- Cultivos alimenticios que se consumen cocidos: papa, camote.
- Cultivos de tallos altos: frutales de árbol
- Cereales procesados: trigo, arroz.
- Cultivos industriales no comestibles: algodón
- Cultivos alimenticios envasados: espárragos, alcachofa.
- Forrajes y pastos naturales: pasto elefante, alfalfa, maíz forrajero.
- Cultivos forestales: eucalipto, pinos

2.1.5. Estándares de acuerdo a la EPA para riego de áreas verdes

La reutilización de agua tratada en el riego áreas verdes constituye una opción en vez del agua potable, reduciendo costos y priorizando el uso que requiere mayores estándares de calidad, para ello la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) desarrolló guías en el que establece estándares que a continuación se presenta en la Tabla 1 (Soderberg, 2016).

Tabla 1

Estándares de parámetros de calidad de agua para riego de áreas verdes establecidas por la EPA (2016)

| Guías de la EPA para riego en áreas verdes | | |
|---|----------------------------|--------------------------------|
| Uso | Tratamiento | Calidad requerida |
| Riego en áreas verdes restringidas al público | Secundario Desinfección | pH = 6 – 9 |
| | | DBO ₅ < 30mg/L |
| | | Turbiedad < 30 UNT |
| | | Coliformes fecales =200/100 mL |
| | | Cloro residual = 1mg/L |

3. Contaminación de las fuentes de agua de riego para áreas verdes

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el 2015, el agua está contaminada cuando su composición se haya alterado de modo que no reúna los medios necesarios para ser utilizada beneficiosamente en el consumo del hombre y el ecosistema. Las características de contaminantes del agua residual dependerán al uso en la industria y población establecida a los alrededores de las

fuentes de subterránea y superficial de agua, como se muestra en la Tabla 2 para actividades representativas (Vélez, 1999).

Tabla 2

Contaminadores comunes de agua subterránea y fuentes asociadas de contaminación.

| Fuente de Contaminación | Tipo de contaminante |
|---|---|
| Actividad agrícola | Nitratos; amoníaco; pesticidas; microorganismos fecales |
| Saneamiento in situ | Nitratos; microorganismos fecales; trazas de hidrocarburos sintéticos |
| Gasolineras y Talleres automotrices | benceno; otros hidrocarburos aromáticos; fenoles; algunos hidrocarburos halogenados |
| Depósito final de residuos sólidos | Amonio; salinidad; algunos hidrocarburos halogenados; metales pesados |
| Industrias metalúrgicas | Tricloroetileno; tetracloroetileno; otros hidrocarburos halogenados; metales pesados; fenoles; cianuro |
| Talleres de pintura y esmaltes | Alcalobencenos; tetracloroetileno; otros hidrocarburos halogenados; metales; algunos hidrocarburos aromáticos |
| Industria maderera | Pentaclorofenol; algunos hidrocarburos aromáticos |
| Tintorerías | Tricloroetileno; tetracloroetileno |
| Manufactura de pesticidas | Algunos hidrocarburos halogenados; fenoles; arsénico; metales pesados |
| Depósito final de lodos residuales domésticos | Nitratos; plomo; cinc; varios hidrocarburos halogenados |
| Curtidurías | Cromo; salinidad; algunos hidrocarburos halogenados; fenoles; |

Fuente: Vélez (1999)

En el año 2024, el Perú generará más del doble de aguas residuales que actualmente manejan las Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS) (Figura 1); además de ello en la Figura 2 se muestra las descargas en metros cúbicos de aguas residuales domésticas sin tratamiento por cada departamento en el Perú en el año 2014, siendo Lima con 54105418.40 m³ (Tabla 1) seguido por Arequipa con 33 000 000 m³ los mayores generadores; éstas conducen que el tratamiento por las Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) generando mayor costo, mayores procesos y por ende mayor el costo de tratamiento (SINIA, 2015).

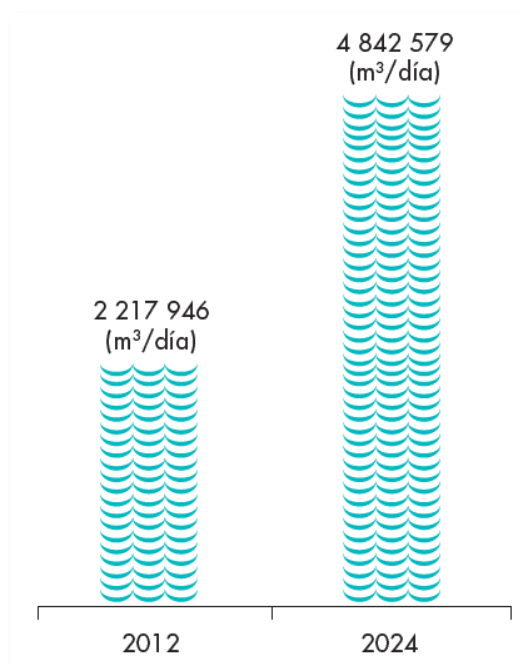


Figura 1. Generación en el Perú de aguas residuales en el año 2012 y proyección al año 2024.

Fuente: Bravo & Gutiérrez (2015)

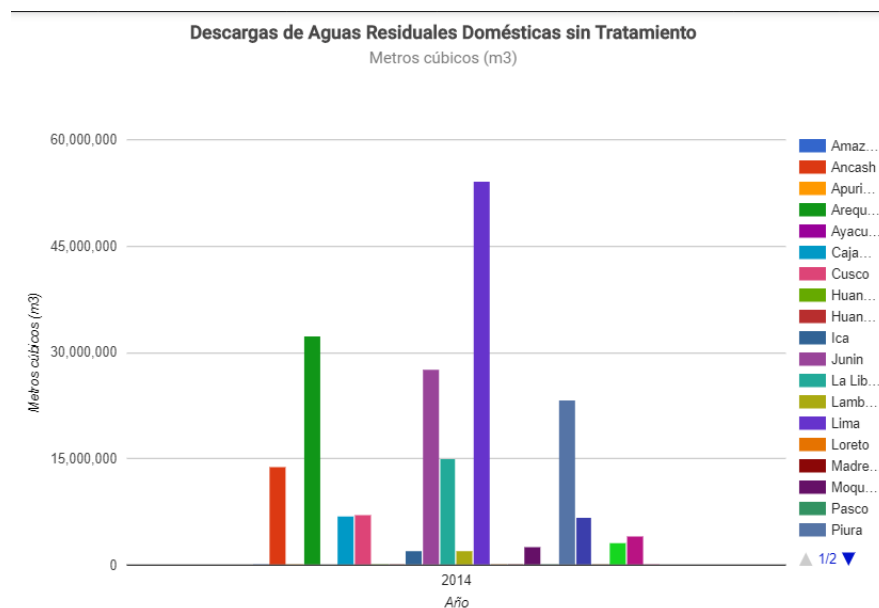


Figura 2. Descargas de Aguas Residuales Domésticas sin Tratamiento (m³) por departamento del Perú

Fuente: SINIA (2015)

La insuficiente o nula cobertura de tratamiento de las aguas residuales urbanas y vertimiento en los ríos, canales de riego agrícola y áreas verdes implican un alto riesgo de diseminación de enfermedades infecciosas y entéricas como la fiebre amarilla, hepatitis, cólera o parálisis infantil y una gran variedad de desórdenes intestinales, disentería, tuberculosis, etc. por huéspedes intermedios como las bacterias coliformes y los estreptococos que se utilizan como índice de contaminación fecal (Andrade & Tipán, 2016); es entonces que el agua se convierte en un agente principal para su transmisión; a ello en el Perú constituye una de las principales causas de mortalidad y morbilidad en la población, especialmente en los niños menores de cinco años; ante la problemática en el 2011 la Organización

de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) trabaja en el Proyecto global e inter-agencia Uso Seguro de las aguas Residuales en Agricultura SUWA para la mejora de la gestión en marco al reúso de aguas residuales, siendo la importancia de establecer guías con valores de calidad en el reúso en beneficio de la salud pública evitando la transmisión de enfermedades (OMS, 2015).

Las evaluaciones y monitoreos efectuados por la DIGESA (2009) y otras instituciones en diferentes cuerpos de agua naturales del país muestran el fuerte impacto de las aguas residuales descargadas en los ríos, o que genera una alta contaminación fecal, como se muestra en la Tabla 3, los metros cúbicos de agua residual doméstica descargado en cuerpos de agua en el departamento de Lima; un caso emblemático es la cuenca del río Rímac que ha sido sistemáticamente monitoreado por DIGESA y SEDAPAL, mostrando que mientras la contaminación minera ha descendido favorablemente, las cargas fecales se elevan debido al aporte de desagües domésticos de las ciudades ubicadas en sus riveras que alcanzan niveles tan altos de coliformes termo tolerantes como por ejemplo, $1.0E^{+6}$ NMP/100 mL antes de su captación en la Planta Potabilizadora de La Atarjea (DIGESA, 2011).

Tabla 3

Descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento en el departamento de Lima (m³)

| Descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento en el departamento de Lima | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| Año | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
| (m ³ de | | | | | | | |
| agua | 342823317. | 341551224. | 348615411. | 357517606. | 362104398. | 215744075. | 54105418. |
| residua | 00 | 00 | 00 | 35 | 00 | 00 | 40 |
| l) | | | | | | | |

Fuente: SINIA (2015)

Para tales excesos la naturaleza ha desarrollado la capacidad de auto depuración para la estabilidad y equilibrio ecológico; que consiste en que estos compuestos son diluidos, sedimentados y transformados progresivamente por la descomposición bioquímica dependiendo de factores, tales como los caudales de avenida y estiaje; volúmenes para la dilución, capacidad de oxigenación según el régimen caudaloso o calmo de las aguas, potencial de hidrógeno y de la temperatura; en el caso de los compuestos químicos en trazas como metales pesados según el proceso que experimenta en el agua de la Figura 3 en el que se experimentan, llegan a precipitar por deposición de la atmósfera o disueltos de minerales del suelo, luego en el agua se adhieren al material particulado suspendido, se mineraliza, seguido por desorción y sedimentación; que siendo contenido en la cadena trófica se acumulan en los tejidos grasos y producir

potencialmente diversos tipos de cánceres, problemas cardiovasculares y otros en el ser humano. Por otro lado los compuestos orgánicos inicialmente en el vertimiento al cuerpo receptor resiste una dilución reduciendo concentraciones, además de sedimentación de sólidos de gran tamaño sedimentables, seguido por la degradación biológica asistida por factores como la temperatura, microorganismos descomponedores y capacidad de oxigenación; siendo ésta la forma que se recupera la estabilidad del cuerpo de agua, por el contrario si existe una carga muy elevada de contaminantes orgánicos se generarían alto porcentaje de fosfatos que a su vez produce el crecimiento de algas que utilizan gran cantidad de oxígeno, aún más para su descomposición, reduciendo al mínimo la cantidad que necesitan los animales acuáticos produciendo su muerte (Bravo & Gutiérrez, 2015). Si la carga de contaminantes es muy elevada caso de las aguas residuales no se puede someter a este principio para la depuración total de un cuerpo receptor y es cuando resulta imposible; forjando ecosistemas forzados donde se modifica su funcionamiento para reducir tensión en procesos ecológicos. Por ende, la importancia de establecer estándares de calidad de agua (ECA) según el tipo de uso que tienen estos cuerpos de agua, que finalmente determinarán el nivel de tratamiento de las aguas que se viertan en ellos (Marín, 2011).

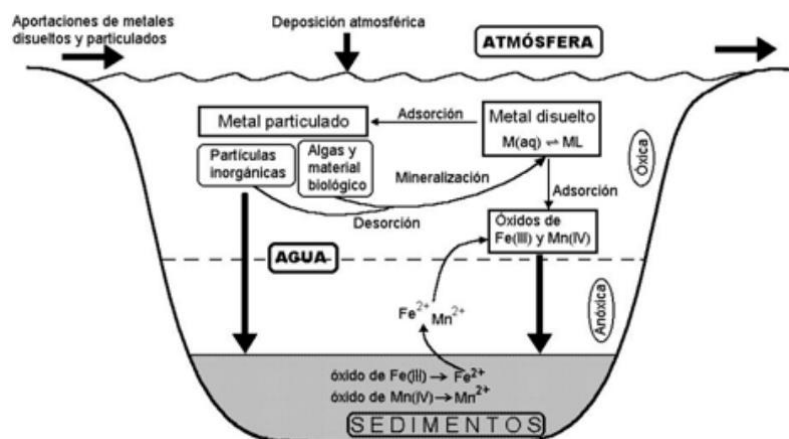


Figura 3. Proceso bioquímico de los compuestos químicos en el agua

Fuente: (Marín, 2011)

Por otro lado, otro factor es la escasez de agua, en la Costa aún cuando abarca sólo el 10% de la superficie total del territorio nacional y dispone apenas del 1.8% de los recursos hídricos nacionales, reside el 55% de la población del país estimada al 2015 en más de 31 millones de habitantes, correspondiendo que la disposición de agua per cápita sea de 2,067 m³/año, valor muy cercano a una situación de estrés hídrico y a pesar de estas serias limitaciones, la costa es la zona con mayor desarrollo económico, y dentro de esta situación, en 2012 ya sustentaba una actividad agrícola en 1,686,777 ha (INEI, 2013).

Ante esta problemática el reúso del agua es más indispensable en la zona costeña por las serias limitaciones de otras fuentes, pero también es importante notar que en sierra y selva la disponibilidad de agua se reduce sensiblemente en la época de estiaje comprendida entre abril y noviembre, que afecta el riego agrícola, por lo que el reúso podría ser una solución para abastecer el agro y áreas verdes

en esa época del año (ANA, 2016). Pero cabe resaltar que el uso del 100% de las aguas residuales en el riego agrícola y áreas verdes libera de algún modo el requisito establecido de estándares de calidad para los vertimientos, los cuales dependerán de las exigencias de cada tipo de reúso establecidas por el EPA o OMS, ya que tampoco es igual regar hortalizas, árboles y áreas verdes (Marín, 2011).

El manejo del recurso hídrico involucra una serie de procesos que deben buscar la solución de conflictos entre los múltiples usuarios que dependen de un recurso compartido. La oferta de agua proviene generalmente de un sistema común que es la cuenca hidrográfica, y los excedentes de uso para el consumo humano, así como de los efluentes del saneamiento, que vuelven a integrar el sistema. Una administración eficiente implica optimizar los usos del recurso hídrico mediante el uso racional y con una calidad aceptable, debiendo esta gestión maximizar con criterio de equidad los beneficios económicos, sociales y ambientales.

En este contexto, el tratamiento de las aguas residuales no puede desligarse del manejo integral del recurso hídrico. La ampliación de la cobertura de tratamiento debe hacerse mediante planteamientos creativos e integrales y no basados en conceptos estrechos y exclusivamente técnicos. Un enfoque integral de cuenca debe enfatizar que el agua residual es parte de los recursos hídricos disponibles, como se representa en la figura 5. De acuerdo a este enfoque, el agua debe ser aprovechada desde que ingresa hasta que sale de la cuenca, lo que implica tomar

acciones en cada etapa. La capacidad de captación puede mejorarse ampliando el volumen de embalses y la cobertura vegetal. La adecuación al tipo de uso, la recolección del agua residual y el tratamiento según el tipo de contaminante que se ha incorporado al agua, deben ser realizados por los usuarios de acuerdo a las características de sus procesos; el uso productivo puede darse en la actividad industrial o agrícola luego de un tratamiento acorde con las exigencias de calidad (Bravo & Gutiérrez, 2015).

Entonces dentro de algunas estrategias para reducir el impacto medioambiental sobre la calidad del agua es la evaluación de alternativas para obtener una producción más limpia, el usar tecnologías sostenibles y ecológicamente racionales; segregar los efluentes (para evitar la mezcla de contaminantes y permitir el reusó de agua cuando sea posible), la recuperación de materias primas y residuos y la selección de tecnologías óptimas para el tratamiento de las aguas residuales. Siendo que más allá de asegurar un uso razonable, social, equitativo y eficiente del agua como recurso, se garantice una gestión sostenible de los ríos y ecosistemas acuáticos.

4. Áreas verdes

Es denominada a la superficie de área verde urbana que están compuestos con vegetación, sobre todo, pastos, árboles y algunos arbustos, por habitante ($\text{m}^2/\text{hab.}$) que cuenta las ciudades; y que son esenciales para el desarrollo urbano sustentable; su principio se basa en el reconocimiento colectivo de que éstas generan una serie de beneficios sociales y ambientales que van más allá del uso

recreativo o estético, sino también contribuyen además a la calidad de vida de sus habitantes, mejoras en la sanidad básica, áreas de recreación a los habitantes del lugar y bienestar físico, como elementos mitigadores de contaminación y sumideros de CO₂, la existencia de espacios verdes dan estructura a la ciudad, y amortiguan el impacto producido por niveles excesivamente altos de densidad y edificación, de ahí su gran importancia como elementos clave en la prevención de riesgos naturales y mitigación de los efectos producidos por el cambio climático, y enriquecimiento de la biodiversidad, entre otros (SINIA, 2016). La Organización de las Naciones Unidas recomienda a los países que las ciudades deben tener por lo menos 16 metros cuadrados de áreas verdes por persona; mientras que la Organización Mundial de la Salud, recomendando al menos nueve; no obstante, es conveniente señalar la importancia de la proximidad y accesibilidad, ya que esta característica es incluso más importante que la cantidad total de superficie verde (OMS, 2011).

La población universitaria UPeU en el año 2018 se proyecta (Anexo 4) que será de 4990 personas entre las cinco Facultades como la de Ingeniería y Arquitectura, Facultad de Ciencias Empresariales, en la Facultad de Ciencias de la Salud, Facultad de Ciencias Humanas y Educación y Facultad de Teología. Además, el total de área verde es 202434 m² en el año 2016 (Anexo 5) y de acuerdo al análisis con la población se cuenta con 33.74 m² de área verde/persona en la UPeU (Anexo 7). Según recomendaciones de la OMS, las ciudades deben disponer, como mínimo, de entre 10 y 15 metros cuadrados de área verde por

habitante, distribuidos equitativamente en relación a la densidad de población. Es aconsejable que esta relación alcance valores entre 15 y 20 metros cuadrados de zona verde útil.

En la Figura 3 se precia que el campus contó con un área total de 58 645 ha (año 1945) de áreas verdes en el que a lo largo de los años se ha visto reduciendo paulatinamente que del año 1945 al 2016 ha habido una reducción del 55% quedando sólo 20 052 ha.

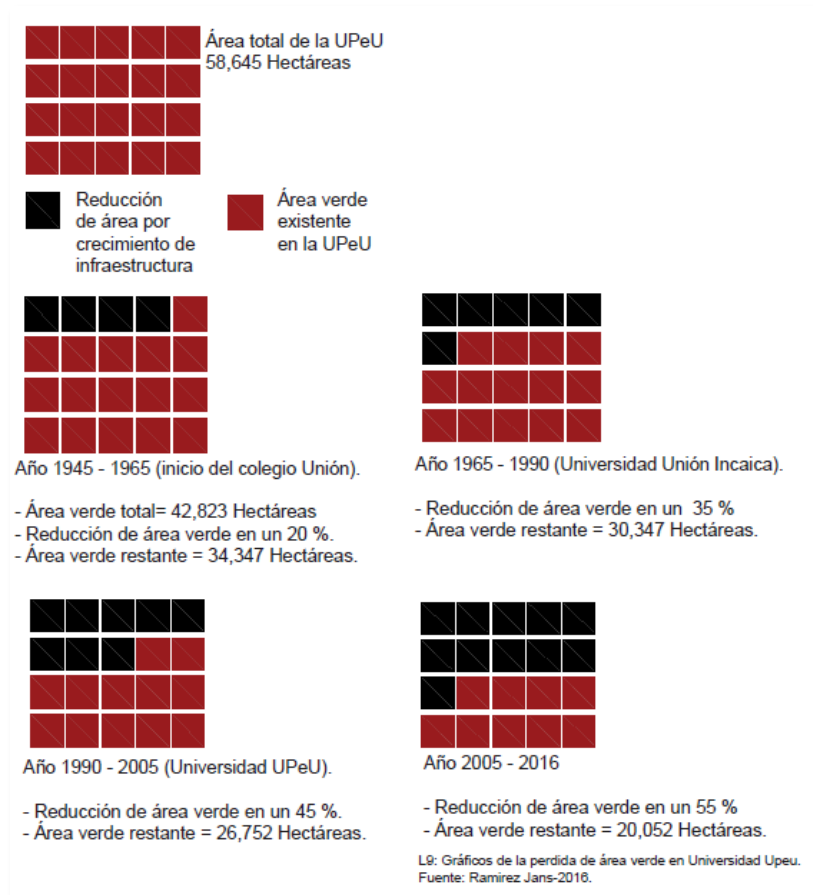


Figura 3. Evolución de la cantidad de áreas verdes en el campus años 1945-2016.

Fuente: Ramirez Jans-2016.

Los beneficios producidos en una ciudad gracias a una presencia significativa de espacios verdes son innumerables. Además de los beneficios en relación al bienestar físico, como elementos mitigadores de contaminación y sumideros de CO₂, las existencias de espacios verdes dan estructura a la ciudad, y amortiguan el impacto producido por niveles excesivamente altos de densidad y edificación, de ahí su gran importancia como elementos clave en la prevención de riesgos naturales y mitigación de los efectos producidos por el cambio climático.

5. Turbidez del agua

La turbidez, como lo define Samame (2016), es una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión, interferencia o suspensión de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua y específicamente debido al contenido de partículas en suspensión tales como arcilla, minerales (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos de sodio, potasio, calcio, magnesio y hierro, etc.), sedimentos, materia orgánica e inorgánica, plancton, bacterias y otros microorganismos; estas partículas causantes de la turbiedad pueden ser coloidales o materia insoluble de mayor tamaño (Barrenechea, 2009); éstos compuestos hacen que la luz sea expedida y no transmitida a través de la suspensión; es decir, como Brito (2007) aclara, lo que se mide como turbiedad es la pérdida de luz transmitida a través de la muestra por difracción de los rayos al chocar con las partículas, y por ello depende no sólo de su concentración sino también de su tamaño y forma.

Las partículas de polvo compuestas de trazas metálicas, gases de efecto invernadero como SO_2 y NO_2 producto de los procesos de combustión, se encuentran en la atmósfera, serán absorbidos por el viento y sopladados hacia los cuerpos de agua; los sólidos en suspensión absorben la radiación solar, de modo que disminuyen la actividad fotosintética de la vegetación acuática; al mismo tiempo obstruyen los cauces, embalses y lagos, también intervienen en los procesos de producción industrial y pueden corroer los materiales y encarecer el costo de depuración (Bravo & Gutiérrez, 2015).

Bravo & Gutiérrez (2015) afirma que el parámetro turbidez cobra importancia por ser paredes protectoras que adsorben microorganismos patógenos, sustancias químicas como metales pesados, compuestos orgánicos de síntesis entre ellos los policlorobifenilos (PCB), pesticidas, etc., como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Compuestos adheridos a un coloide

En la Figura 5 se ilustra el tamaño aproximado de las partículas; sin embargo, que en el caso de los coloides, sus dimensiones las define la naturaleza de los mismos (Barrenechea, 2009)

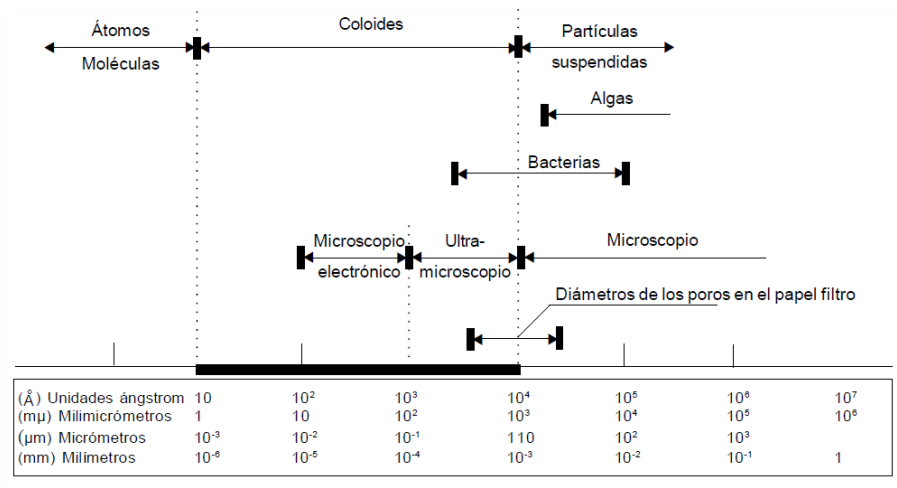


Figura 5. Distribución de tamaños de las partículas en el agua

Fuente: Barrenechea (2009)

Entre los diversos compuestos encontramos a la materia orgánica, en el Black y Christman (como se citó en Idrovo, 2011) analizaron varias calidades de agua y encontraron entre 15-50 mg/L de materia orgánica en ellas, de la cual un promedio de 87% era ácido fúlvico, 11% ácido himatomelánico y 2% ácido húmico. y su remoción evita la formación de compuestos organoclorados tóxicos y cancerígenos producto de la reacción con los desinfectantes como el cloro: CHCl_3 , trihalometanos, ácidos haloacéticos, halorgánicos (Morejón, 2017a) y principalmente cloroformo, catalogado como un compuesto carcinógeno, en estudios con animales. Este tema es motivo de preocupación y de muchas

investigaciones, dada su significación para la salud (Arboleda, 2000; Silva, 2015); y como en tantos tóxicos cancerígenos, resulta muy difícil establecer la relación causa-efecto entre cloración y carcinogenicidad, debido al largo periodo de latencia (de 20 a 30 años) entre exposición y supuesta aparición del cáncer halorgánicos (Morejón, 2017a). Por lo que se recomienda clorar agua sólo con niveles inferiores a 5 UNT, este valor corresponde al de la guía de la OMS (2011) y a la norma de agua potable; en caso de no eliminar la turbiedad se pueden encontrar coliformes fecales en agua con cloro residual libre.

Mientras que sustancias químicas los más destacables por su peligrosidad son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's), (núcleos aromáticos condensados), no sólo presentes en pequeñísima cantidad en el petróleo; son cancerígenos y, en particular el benzopireno, en el que ha observado un corto periodo de latencia; por consiguiente, parece ser que los detergentes potencian su toxicidad, como antes se ha dicho, a pesar de su inercia química se ha comprobado su biodegradación, aunque lenta (Marín, 2011).

Córdoba (2013) estudió la implicación de coloides y nanopartículas en la migración de contaminantes en el medio ambiente; el estudio está basado en el escenario considerado es el aumento de la entrada de nanopartículas sintéticas en el medio ambiente, como consecuencia del gran auge de la nanotecnología en los últimos años. Se conoce muy poco acerca del comportamiento que estas partículas de síntesis tienen en la naturaleza y de cómo pueden afectar a la migración de otros contaminantes. Se siguió la metodología basado en el análisis de la estabilidad de

coloides (comportamiento de agregación-desagregación) y en el análisis de la adsorción de distintos contaminantes en las superficies coloidales. La adsorción se ha abordado desde una perspectiva experimental y a través del desarrollo de modelos mecanicistas de adsorción que permitan predecir la interacción contaminante-coloide en condiciones físico-químicas específicas con la ayuda de los códigos geoquímicos computacionales.

Además, Gabriela & Jaramillo (2015) desarrollan la importancia sanitaria de la turbiedad que radica en que por sus componentes arcillosos y orgánicos adsorben otros compuestos como plaguicidas, fomenta un mayor desarrollo de los microorganismos patógenos que se introducen dentro de las partículas, esta superficie sirve para que éstos se alimenten y reproduzcan, protegiendo de los desinfectantes.

Tabla 4

Los principales agentes infecciosos y organismos productores de toxinas presentes en las aguas contaminadas domésticas usadas en el riego agrícola y áreas verdes

| Organismo | Agente infeccioso |
|----------------------------------|--|
| Bacterias | |
| <i>Campylobacter jejuni</i> | Gastroenteritis, artritis reactiva. |
| <i>Escherichia coli</i> patógena | Gastroenteritis y septicemia, síndrome urémico hemolítico. |

| | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| <i>Salmonella typhi</i> | Fiebre tifoidea |
| <i>Shigella spp.</i> | Shiguelosis (disenteria bacilar) |
| <i>Vibrio cholerae</i> | Cólera |
| <i>Yersinia enterocolitica</i> | Yersiniosis (enterocolitis) |

Virus

| | |
|------------------------------------|---|
| <i>Virus de la hepatitis A y E</i> | Hepatitis infecciosa |
| <i>Rotavirus</i> | Gastroenteritis |
| <i>Parvovirus</i> | Gastroenteritis |
| <i>Adenovirus</i> | Enfermedad respiratoria, infecciones oculares, gastroenteritis. |
| <i>Enterovirus</i> | Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis, otras. |

Protozoarios

| | |
|---|-------------------------------------|
| <i>Cryptosporidium hominis / parvum</i> | Criptosporidiosis, diarrea, fiebre. |
| <i>Entamoeba histolytica</i> | Amebiasis (disentería amebiana) |
| <i>Giardia intestinalis</i> | Giardiasis (gastroenteritis) |
| <i>Microsporidia</i> | Diarrea |

Helmintos

| | |
|----------------------------------|---|
| <i>Ascaris lumbricoides</i> | Ascariasis (infección por lombrices) |
| <i>Trichuris</i> | Tricuriasis (infección por T. trichiuria) |
| <i>Taenia</i> | Teniasis (infección por tenia) |
| <i>Ancylostoma (spp.)</i> | Larva migrans cutáneo (infección por anquilostomas) |
| <i>Strongiloides stercoralis</i> | Estrongiloidiasis (infección por nematodos) |

Fuente: ANA (2016)

En la Tabla 5 se presenta la persistencia de diferentes gérmenes patógenos en el agua, suelo y productos regados, así como la carga excretada por una persona enferma. Nuevamente se observa que hay organismos como el *Campylobacter spp.* que tienen una supervivencia muy corta de solo algunos días en el ambiente externo al cuerpo humano; en cambio, los huevos de *Áscaris lumbricoides* pueden sobrevivir en el medio ambiente hasta por 12 meses.

Tabla 5

Persistencia de patógenos entéricos presentes en aguas residuales, suelo, y productos regados.

| Organismo | Carga excretada por una persona enferma | Supervivencia (días) |
|---------------------------------|--|-----------------------------|
| <i>Campylobacter spp.</i> | 1. E+08 | 15 |
| <i>Giardia lamblia</i> | 1. E+06 | 20 |
| <i>Entamoeba histolytica</i> | 1. E+06 | 20 |
| <i>Shigella spp.</i> | 1. E+08 | 30 |
| <i>Vibrio cholerae</i> | 1. E+08 | 30 |
| <i>Samonella typhi</i> | 1. E+09 | 60 |
| <i>Salmonella spp.</i> | 1. E+09 | 90 |
| <i>Echerichia coli</i> patógena | 1. E+09 | 90 |
| <i>Enteovirusw</i> | 1. E+08 | 90 |
| Hepatitis A virus | 1. E+07 | 90 |
| <i>Ancylostoma duodenale</i> | 1. E+03 | 90 |
| <i>Trichurus trichura</i> | 1. E+04 | 180 |
| <i>Taenia saginata</i> | 1. E+05 | 180 |
| <i>Ascaris lumbriciodes</i> | 1. E+05 | 360 |

*Promedio estimado de supervivencia de estados infectivos a 20-30°C. Carga excretada: número promedio de organismos/g de heces.

Fuente: (ANA, 2016)

Las normas establecidas por la OMS en los últimos 50 años han sido, en general, muy estrictas, ya que se han basado en una evaluación teórica de los posibles riesgos que para la salud tiene la supervivencia de agentes patógenos en las aguas, el suelo y los cultivos, antes que en pruebas epidemiológicas fehacientes del riesgo real (OMS, 2015); en tanto los estándares internos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) establecen que las aguas de consumo humano deben tener preferentemente 1 UNT y en ningún caso más de 5 UNT. Las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá y las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan como valor guía 5 UNT (Oliveros & Moscote, 2016).

Para tales casos de riego en áreas verdes restringidas al público, la turbidez debe ser preferiblemente inferior a < 30 UNT como se muestra en las Guías de EPA para la reutilización de aguas residuales para la agricultura (Soderberg, 2016).

Por ende, los valores de turbidez sirven para determinar el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración, así como para determinar el uso a destinar como la potabilidad (Samame V., 2016).

La clasificación de acuerdo al tamaño de espectros de las partículas es:

a. Partículas coloides

Los coloides son las partículas de diámetro entre 1 μm y 1nm y para tener una referencia en la Figura 6 se muestra en relación a la molécula, virus, bacterias y el grosor de un cabello; y por eso son de muy baja sedimentación por lo que la forma de eliminarlos es por los procesos de coagulación-floculación, en el que se desestabilizan la carga electrostática para promover que los coloides se aglomeren y por proceso físico éstos se decanten al ganar peso (Arboleda, 2000).

La proporción superficie/volumen da muy buenas condiciones de adsorción de los coloides para los iones libres como compuestos químicos; éste fenómeno implica la presencia de la carga electrónica en su superficie que da lugar a algunas fuerzas de repulsión, éste es el porqué de que los coloides son tan estables en la solución (Brito, 2007).

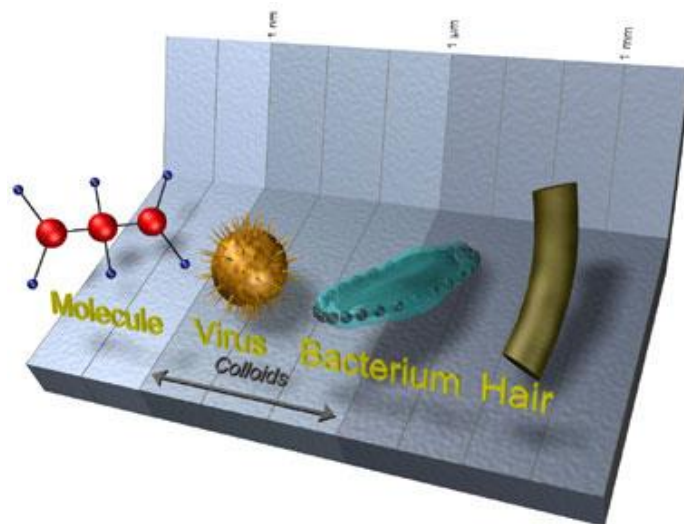


Figura 6. Diámetro de partículas coloidales en relación a una molécula, virus, bacteria y grosor de un cabello

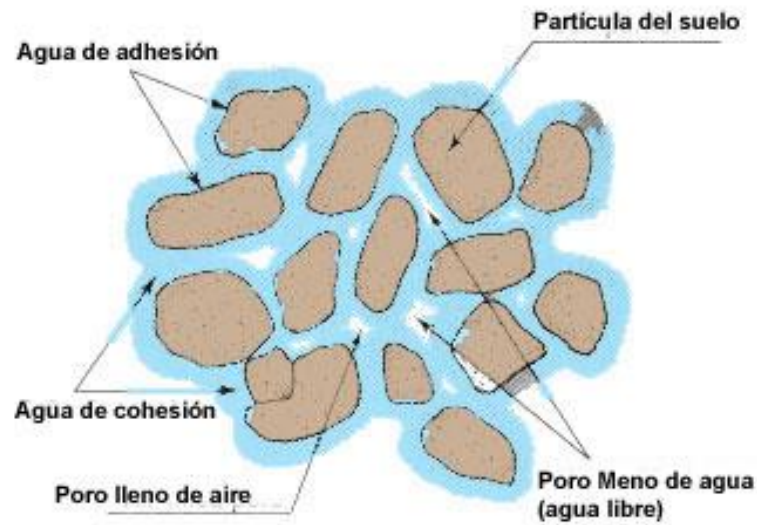


Figura 7. Interfaces donde ocurren los intercambios y fenómenos de superficie

Los coloides pueden existir en dos grupo: el primero son los coloides hidrofóbicos son responsables de la coloración del agua y tienen básicamente un origen orgánico (arcillas, metales y compuestos húmicos) con una parte $R-NH_2$ o $R-OH$; estas partes electronegativas crean enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua; es decir no son rodeados de moléculas de agua, su dispersión dentro del agua no es espontánea por lo que requiere de la ayuda de medios químicos y físicos (Andía, 2000). Esta capa se opone a la unión de los coloides y es el factor de la estabilización de la interfaz como se muestra la en la Figura 7 (Gabriela & Jaramillo, 2015).

La importancia de este tipo de coloides es que en el proceso de coagulación/floculación debido a su estabilidad, que depende de un fenómeno eléctrico explicado por la teoría de la doble capa, ésta teoría se basa en fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión, considera que el coloide (carga negativa)

está rodeado de una doble capa eléctrica de la siguiente forma: a la superficie del coloide acuden tantos cationes del medio (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , etc.) sean necesarios para neutralizar la carga (Capa adherida o Stern), pero la agitación térmica tienden a separar algunos de la superficie (Capa difusa o Gouy) (Arboleda, 2000).

Mientras que el segundo, son los coloides hidrofílicos de origen mineral como detergentes y proteínas, en su superficie están las cargas negativas concentradas que dan lugar a que la aglomeración sea imposible, se dispersan espontáneamente dentro del agua y son rodeados de moléculas de agua que previenen todo contacto posterior entre estas partículas (Andía, 2000) La carga eléctrica y la capa de agua que rodean las partículas hidrófilas tienden a desplazar las partículas unas de otras y, en consecuencia los estabiliza dentro de la solución.

Los coloides nunca son básicamente 100% hidrofílicos ni 100% hidrofóbicos, el porcentaje dependen realmente de su constitución molecular, se obtienen más bien partículas hidratadas a los diferentes grados (Andía, 2000).

Se describe las propiedades de los coloides desde el punto de vista físico, las arcillas son cristales con una estructura atómica reticular; la mayoría de ellas puede caracterizarse por dos clases de estructuras, las principales propiedades son las cinéticas, ópticas, de superficie y electrocinéticas (Arboleda, 2000). La propiedad cinética explica el fenómeno como resultado del bombardeo desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del líquido, y son las que

definen el comportamiento de las partículas coloidales referidas a su movimiento en el agua como son las de movimiento browniano, difusión y presión osmótica.

Al elevarse la temperatura del líquido producto de la alteración entre las partículas y moléculas, éstas adquieren mayor energía cinética aumentando el movimiento browniano en el que las partículas coloidales, dentro de la fase líquida, presentan una actividad constante e irregular. Denominada así por su descubridor, el botánico escocés Robert Brown (1773 - 1858), quien por primera vez observó bajo el microscopio este movimiento constante en las partículas provenientes del polen.

Debido al movimiento browniano, que es constante, las partículas coloidales tienden a dispersarse por todas partes en la fase líquida, es entonces que su velocidad es menor, a este fenómeno se le denomina difusión (Marín, 2011)..

Mientras que, la presión osmótica es el flujo espontáneo que se produce cuando un disolvente (agua) atraviesa una membrana permeable que la separa de un sistema coloidal (agua + coloides) y la dilución ocurre únicamente con el movimiento del solvente hacia el sistema coloidal a través de la membrana (Vazquez, 2007).

b. Partículas en suspensión

Los sólidos en suspensión son partículas pequeñas compuesta de la disolución de sustancias minerales y de la descomposición de sustancias orgánicas, inmersas en un fluido que actúa sobre la partícula con fuerzas en

direcciones aleatorias, que contrarrestan la fuerza de la gravedad, impidiendo así que el sólido se deposite en el fondo (Morejón, 2017a).

Los factores que hacen que una partícula no se decante en el fondo, son el tamaño, densidad y forma de la partícula y la velocidad del agua (Gabriela & Jaramillo, 2015). La medición de la turbidez proporciona una estimación de la concentración de Sólidos Totales en Suspensión (STS) (Enrique, Verbel, Darío, Martínez, & Aguas, 2014).

c. Sólidos totales disueltos

Se entiende por sólido disuelto o sólidos filtrables todo residuo que queda después de filtrar en membranas de 1.2 μm de poro y evaporar el agua a 103°C. El intervalo usual de sólidos disueltos totales en agua de abastecimiento varía de 25 a 5000 mg/l, en función de la geología local y la concentración normalmente deseable es de 200mg/l (Brito, 2007).

Bravo & Gutiérrez (2015) destacan la importancia de la presencia de estos sólidos disueltos es que tienen efectos en el sabor, se considera que menos de 600 mg/l no se perciben, aunque contenidos muy bajos producen un agua insípida, además de por la composición los sólidos disueltos promueven la corrosión, si su contenido es de iones contiene sodio, magnesio o sulfato; y la reducción se logra mediante la ósmosis inversa, la electrodiálisis, la destilación, el intercambio iónico o coagulación- floculación-sedimentación-filtración.

d. Sólidos totales

Barrenechea (2009) y Oliveros & Moscote (2016) definen que al residuo remanente como el que queda después de secar una muestra de agua a $103 \pm 105^\circ \text{C}$; equivalen a la suma de los sólidos disueltos y suspendidos.

6. Proceso de coagulación y floculación para el tratamiento del agua

Guzmán et al. (2013) lo definen como el procesamiento del agua cruda en un tratamiento fisicoquímico, conocido como coagulación, en el que se adiciona sustancias químicas y la provisión fuerza de mezcla, para que las partículas de muy pequeño tamaño y algunos contaminantes disueltos; lo que consiste una suspensión coloidal, que suelen ser muy estables, en muchas ocasiones debido a interacciones eléctricas entre las partículas, por tanto tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta; permitiendo en este proceso que se aglutinen en partículas más grandes que puedan sedimentar y retirar mediante procesos de remoción de sólidos; no obstante Arboleda (2000) puntualiza que la coagulación es un proceso donde el potencial repulsivo de la doble capa eléctrica del coloide es reducido, de tal manera, que se pueden producir micro-partículas, que colisionan con otras y forman estructuras más grandes (flóculos) en el proceso de floculación a remoción de turbidez y de organismos en los suministros de agua involucra la eliminación de impurezas que están cargadas negativamente a niveles de pH natural y han formado una dispersión estabilizada.

Mosquera (2014) afirma que la coagulación puede entenderse como la desestabilización eléctrica de algunas partículas mediante la adición de sustancias

químicas que son los coagulantes, que se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible.

Así también Brito (2007) lo define como el proceso en el que se añaden compuestos químicos al agua para reducir las fuerzas que separan a los sólidos suspendidos menores a 10 μm (orgánicos e inorgánicos) para que formen aglomerados que sean removidos por sedimentación; llevado a cabo en dos etapas: en la primera o coagulación, las fuerzas interpartícula, responsables de la estabilidad de los coloides, son reducidas o anuladas por la adición de reactivos apropiados, y en la segunda o floculación, las colisiones entre las partículas favorecen el crecimiento de flóculos que puedan ser eliminados por sedimentación.

Barrenechea (2009) añade que, en el primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva; este proceso depende de la dosis, concentración del coagulante y el pH final de la mezcla; y el segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua. Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etcétera.

A ello Bravo & Gutiérrez (2015) añaden que en la práctica la primera etapa se realiza mediante un mezclado rápido para dispersar el coagulante y favorecer su contacto con las partículas en suspensión en tanto que, en la segunda, se

efectúa una mezcla lenta con el fin de promover la formación y el aumento de tamaño y/o densidad de los flóculos formados para que puedan sedimentar.

Los contaminantes que se eliminan por coagulación (Figura 8) son aquellos que poseen un alto peso molecular, de esta forma, se elimina sólidos suspendidos, remoción de color aparente y aparente, material coloidal, algunos precursores de trihalometanos (Mosquera, 2014), eliminación de bacteria, virus y organismos patógenos; destrucción de algas y plancton en general, precipitados químicos suspendidos y moléculas, no obstante este proceso no sirve para eliminar compuestos orgánicos solubles (Brito, 2007). Las partículas coloidales presentan una carga negativa en el agua, lo cual impide la aproximación de las mismas y en el tratamiento del agua que será necesario alterar esta fuerza iónica mediante la adición de sales de aluminio, hierro, polímeros sintéticos o naturales que provoquen el fenómeno de la coagulación (Barrenechea, 2009)

Díaz (2014) señala de acuerdo a sus investigaciones, que las ventajas de este proceso con coagulantes químicos, generación de un lodo artificial el cual puede ser tratado con mayor facilidad y eficiencia; costos bajos de producción, y eliminación de sustancias productoras de sabor y olor. Por otro lado las desventajas son, alteración del pH del agua, incremento del consumo del cal para estabilizar pH, dependencia de las características fisicoquímicas del agua, dosis mayores ante cambios de características fisicoquímicas del agua; dependencia de la velocidad de agitación del agua y requiere personal para manejo de componentes químicos (Díaz, 2014).

En el proceso de coagulación, O'Melia y Stumm (como se citó en Bravo & Gutiérrez, 2015) han demostrado la existencia de una dosis óptima que varía en función del pH y de la concentración de coloides presente en el agua cruda; puntualizan que con dosis menores que la óptima no se desestabilizan los coloides y con dosis mayores, se reestabilizan, lo que deteriora la calidad del efluente. Asimismo, Argaman y Kaufman (como se citó en Bravo & Gutiérrez, 2015) demostraron también que, para obtener una eficiencia dada, existe un tiempo de retención mínimo, que pertenece a un determinado valor de gradiente de velocidad y que, por debajo de este valor, ya no se obtiene la misma eficiencia, no importa cuál sea el gradiente de velocidad aplicado en el proceso. Por esta razón los autores alinearon principalmente al modelo de prueba de jarras hacia la determinación y optimización de las variables químicas del proceso de coagulación (Bravo & Gutiérrez, 2015).

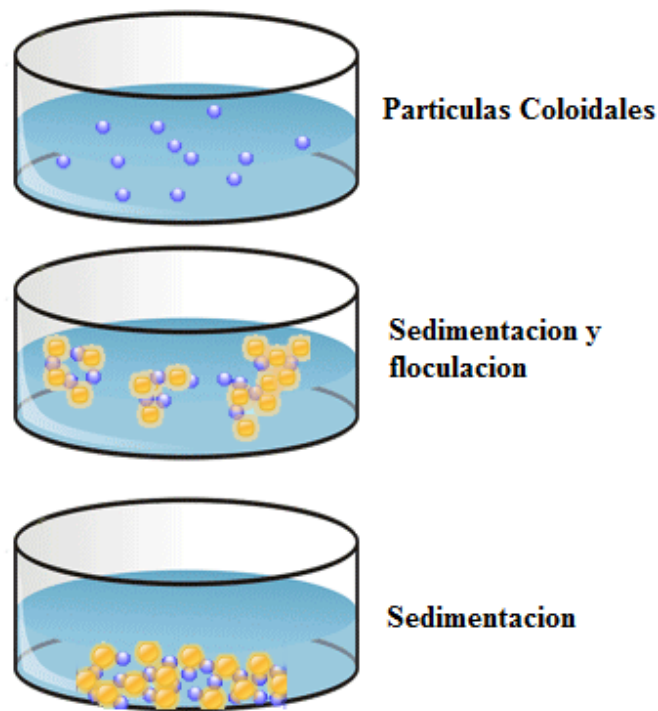


Figura 8. Proceso de coagulación – floculación por el cual las partículas se aglutinan con uso de coagulante en pequeñas masas, con peso específico superior al del agua, llamadas flóculos.

Las características del agua cruda que más influyen en la eficiencia del proceso son la concentración de coloides, alcalinidad, pH, el tamaño de las partículas y la temperatura. Se presentan cuatro situaciones diferentes en la Tabla 6 se demuestra el tipo de coagulación y el requerimiento de dosis de coagulante de acuerdo a la concentración de coloides y alcalinidad en el agua.

Tabla 6

Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación

| | Tipo de agua | Tipo de coagulación | Requerimiento |
|---|---|--|--|
| 1 | Baja concentración de coloides, baja alcalinidad. | Formación de precipitación. Floc de barrido. | Alta dosis de coagulantes. Adición de alcalinidad o partículas o ambas. |
| 2 | Baja concentración de coloides, alta alcalinidad. | Formación de precipitación. Floc de barrido. | Alta dosis de coagulantes. Adición de partículas. |
| 3 | Alta concentración de coloides, baja alcalinidad. | Adsorción de polímeros metálicos positivos, en la superficie de los coloides (pH 4 a 7). | Dosis de coagulantes incrementa con concentración de partículas, adición de alcalinidad. |
| 4 | Alta concentración de coloides, alta alcalinidad. | Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos (pH >7). | Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas. |

Fuente: Barrenechea (2009).

Barrenechea (2009) explica la influencia de las características de concentración de coloides en la coagulación en las cuatro situaciones:

a) Alta concentración de coloides y alcalinidad baja

En este sistema solo se debe determinar el parámetro químico de dosis óptima de coagulante en el que la desestabilización se ejecuta por medio de la

adsorción de especies hidrolíticas con carga positiva, dependiendo del coagulante producidos en niveles de pH ácidos de 4 a 6.

b) Alta concentración de coloides y alcalinidad alta

La desestabilización es por adsorción y neutralización de la carga, ésta última cuando el pH (neutros o ácidos) permanece generalmente en la región neutral (Figura 6)

c) Baja concentración de coloides y alcalinidad alta

La desestabilización es por adsorción y la neutralización de la carga; y siendo que existe baja concentración de coloides se requiere dosis de coagulantes relativamente alta para capturar las partículas que se encuentran dispersas; siendo una opción agregar arcilla o bentonita, para aumentar la concentración coloidal y el contacto interparticular.

d) Baja concentración coloidal y alcalinidad baja

Al agregar coagulante el pH disminuye lo que no permite la creación En estos sistemas la coagulación es más difícil. La coagulación por medio de captura se dificulta, ya que el pH disminuye al agregar el coagulante y no permite la formación de hidróxidos. Asimismo, la coagulación por medio de adsorción también es difícil, ya que la concentración coloidal es demasiado baja para permitir el contacto interparticular. Para realizar una coagulación efectiva, deberá agregarse alcalinidad adicional y/o bentonita o preferentemente arcilla (Ramírez & Jaramillo, 2015).

La Figura 9 presenta la reacción entre la dosis de coagulante y la concentración coloidal (m^2/L) con pH constante. Las concentraciones bajas de

coloide (S_1 en la figura) requieren la producción de grandes cantidades de precipitado de hidróxido amorfo; mientras que, para mayores concentraciones de coloide (S_2 y S_3 en la figura), se necesitan menores dosis de coagulante que en el caso S_1 .

En las zonas S_2 y S_3 las partículas coloidales proveen núcleos para la precipitación, mientras que, en S_5 , el mismo hidróxido debe proveer los núcleos. En el transcurso de S_2 a S_4 se puede notar que al aumentar las concentraciones de coloides se requiere también aumentar las de coagulante (Barrenechea, 2009).

Las curvas de coagulación pueden dividirse en cuatro zonas:

La zona 1, corresponde a dosis bajas, donde se ha agregado coagulante en cantidad insuficiente para realizar la desestabilización.

La zona 2, corresponde a dosis un poco más altas, donde se realiza la desestabilización y el flóculo precipita.

La zona 3, donde dosis aún más altas pueden reestabilizar las dispersiones con ciertos valores de pH.

La zona 4, que tiene gran cantidad de hidróxido de aluminio (o hierro), actúa de tal forma que captura las partículas coloidales (coagulación de barrido).

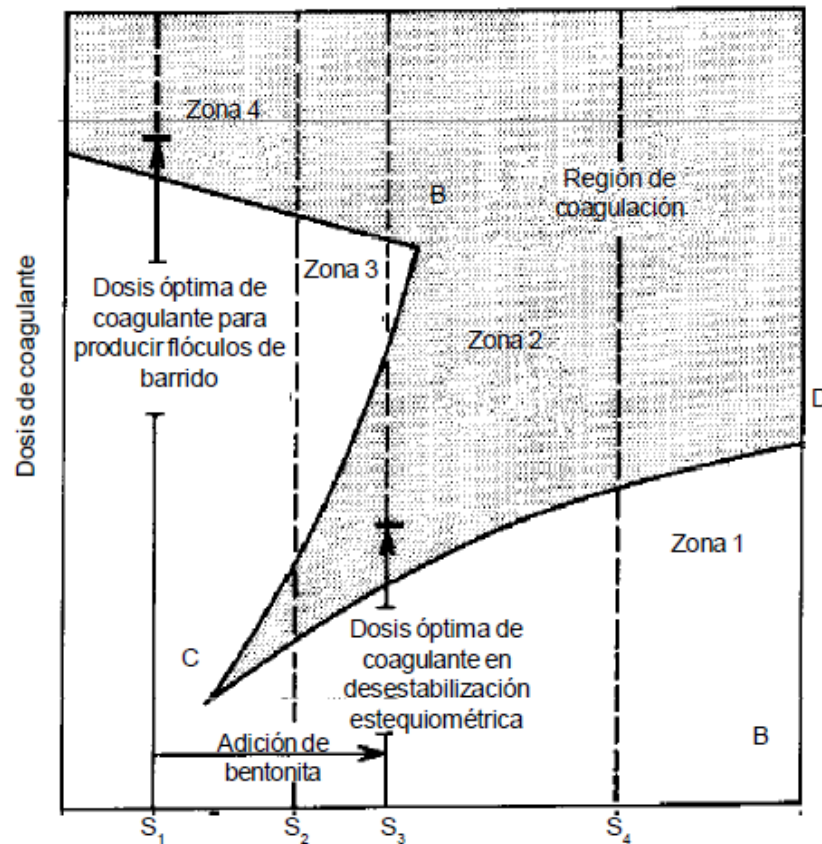


Figura 9. Concentración de coloide, expresada como concentración de superficie

Fuente: (Barrenechea, 2009)

6.1. Mecanismos del proceso de coagulación

Considerando la discusión teórica que antecede, Stumm y O'Melia (como se citó en Barrenechea (2009) identificaron varias etapas en el proceso de coagulación.

- a. Fase de mezcla del polímero que se distribuye en la suspensión de manera uniforme y rápida.

- b. Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes y su consecuente polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas.
- c. Precipitación y formación de compuestos químicos que se polimerizan.
- d. Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr la desestabilización del coloide.
- e. Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante un puente entre las partículas que involucra el transporte de estas y las interacciones químicas.
- f. Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante el transporte de las mismas y las fuerzas de Van der Waals.
- g. Formación de los flóculos.
- h. Precipitación del hidróxido metálico.

Algunas de estas etapas ocurren secuencialmente, otras coinciden parcialmente y otras incluso pueden ocurrir simultáneamente. Se puede suponer que las diferentes etapas de la reacción pueden resultar controlables en un cierto porcentaje, bajo diversas condiciones químicas (Figura 10).

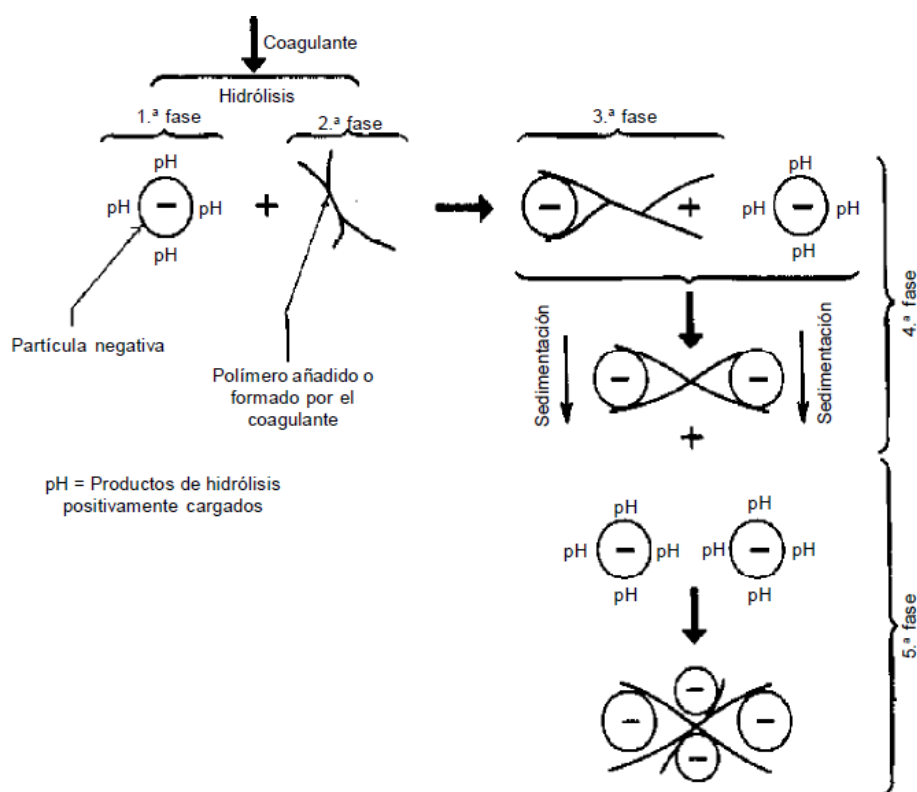


Figura 10. Modelo esquemático del proceso de coagulación

Fuente: (Barrenechea, 2009)

Actualmente Barrenechea (2009) considera la coagulación como el resultado de la acción de cuatro mecanismos:

a. Adsorción

Se presenta cuando el agua presenta una alta concentración de partículas al estado coloidal; cuando el coagulante es adicionado al agua turbia los productos solubles de los coagulantes son absorbidas por los coloides y forman los flóculos en forma casi instantánea por compresión o interpenetración (Figura 11) (Vazquez, 2007).

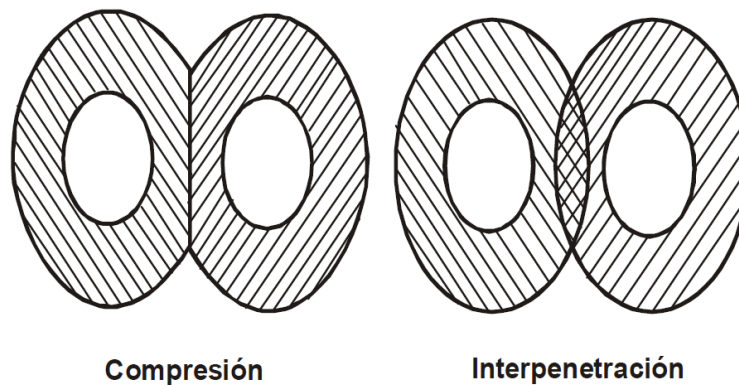


Figura 11. Interacción repulsiva debido a polímeros adsorbidos en la superficie de coloides

Fuente: (Barrenechea, 2009)

Debido a la gran superficie específica de los coloides y su gran capacidad de adsorción no resulta práctico sedimentar las partículas coloidales sin tratamiento químico previo.

Como se puede comprobar en la Tabla 7, las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa. Nótese el efecto que, a la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial, mayor es el tiempo de sedimentación requerido. Teniendo como ejemplo la grava de diámetro 10 mm y área de 3.15 cm^2 requiere 0.3 s para sedimentar; mientras que, una partícula coloidal de 0.000001 mm tiene una mayor área 2.83 ha y por ende requeriría 63 años para sedimentar.

Tabla 7

Efecto al disminuir el tamaño de las esferas

| Diámetro de partícula (mm) | Escala de tamaños | Área superficial total ^a | Tiempo requerido para sedimentar ^b |
|-------------------------------|--------------------|--|--|
| 10 | Grava | 3.15 cm ² | 0.3 s |
| 1 | Arena gruesa | 31.50 cm ² | 3.0 m/s |
| 0.1 | Arena fina | 315.00 cm ² | 38.0 s |
| 0.01 | Sedimento | 3.150.00 cm ² | 33.0 min |
| 0.001 | Bacteria | 3.15 m ² | 55.0 horas |
| 0.0001 | Partícula coloidal | 31.5 m ² | 280.0 días |
| 0.00001 | Partícula coloidal | 0.283 ha | 6.3 años |
| 0.000001 | Partícula coloidal | 2.83 ha | 63.0 años |

^a Área de partículas del tamaño indicado, producida a partir de una partícula de 100 mm de diámetro y gravedad específica de 2.65.

^b Cálculos basados en esferas con gravedad específica de 2.65 que sedimenta 30 cm.

Fuente: (Barrenechea, 2009)

b. Compresión de capa difusa

Barrenechea (2009) comprende este modelo físico de doble capa como el que puede explicar el fenómeno de la desestabilización de un coloide por un coagulante como se puede apreciar en las Figuras 12 y 13, la curva de atracción de Van der Waals es fija mientras que la de repulsión eléctrica disminuye si se incrementan en la solución los iones de carga opuesta. En consecuencia, si se reduce el potencial repulsivo, decrece también la curva resultante de interacción.

Por lo tanto, las partículas pueden acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van der Waals.

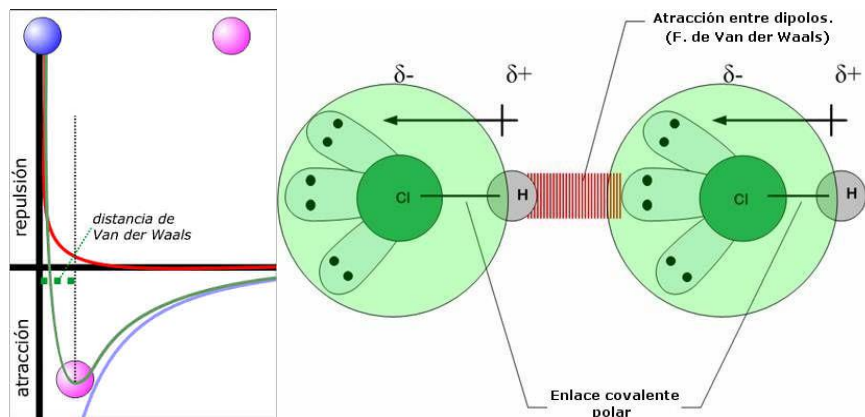


Figura 12. Esquema de la atracción por fuerza de Van der Walls

Fuente: (Arboleda, 2000)

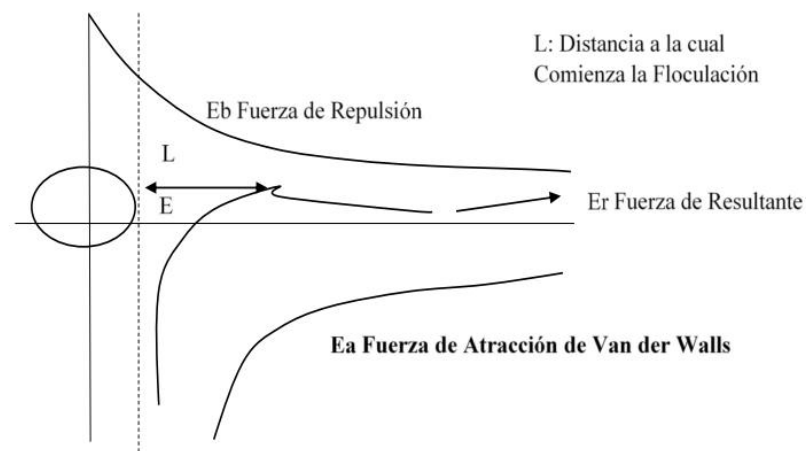


Figura 13. Fuerzas de atracción y repulsión Fuente: (Andía, 2000)

La introducción de un electrolito indiferente en un sistema coloidal causa un incremento de la densidad de cargas en la capa difusa y disminución de la “esfera” de influencia de las partículas, y ocurre la coagulación por compresión de la capa

difusa como se muestra en la Figura 14. Concentraciones elevadas de iones positivos y negativos (fuerza iónica grande) en el agua acarrearán un incremento del número de iones en la capa difusa que, para mantenerse eléctricamente neutra, necesariamente tiende a reducir su volumen, de modo tal que las fuerzas de Van der Waals sean dominantes, y se elimine la estabilización electrostática. Un ejemplo típico de este mecanismo ocurre cuando aguas dulces con fuerza iónica pequeña se mezclan con agua de mar, lo que promueve la formación de depósitos en las desembocaduras. Cabe destacar dos aspectos interesantes sobre ese mecanismo de coagulación: La concentración del electrolito que causa la coagulación es prácticamente independiente de la concentración de coloides en el agua (Barrenechea, 2009) Las suspensiones coloidales están sujetas a ser estabilizadas y desestabilizadas.

Las fuerzas de estabilización o repulsión son por la carga de las partículas o la hidratación, que generalmente es importante para los coloides hidrofílicos; mientras que los factores de atracción o desestabilización son la gravedad que es insignificante en la desestabilización de las partículas coloidales y, por lo tanto, no se tratará con mayor detalle; el movimiento browniano, que permite que las partículas entren en contacto, lo que constituye un requerimiento para la desestabilización; y la fuerza de Van der Waals que es una fuerza débil de origen eléctrico, postulada por primera vez por el químico holandés Johanns Diderick van der Waals; es un factor muy importante, pues constituye la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales, estas fuerzas siempre atractivas, que decrecen

rápidamente con la distancia, se deben a la interacción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas.

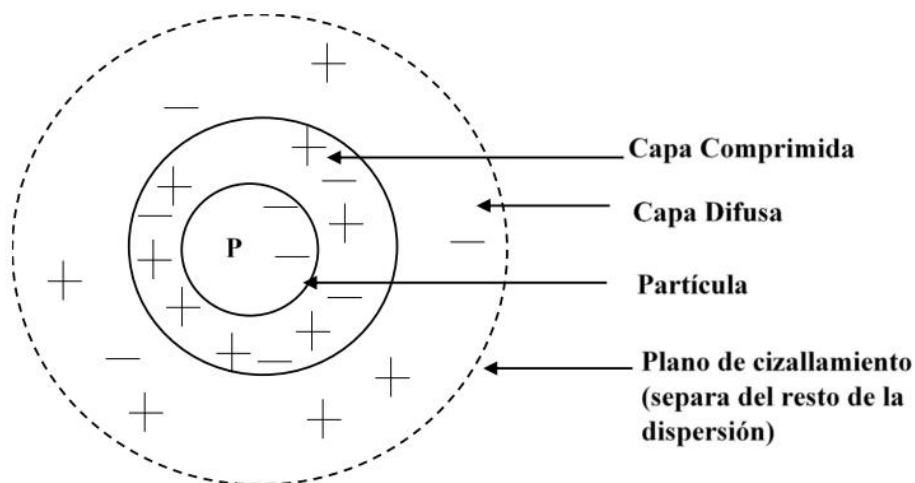


Figura 14. Doble capa de una partícula coloidal

Fuente: (Andía, 2000)

Como la superficie de la partícula es negativa, hay un cúmulo de iones positivos en la región de interfaz (sólido-liquido) que forman, junto con la carga negativa de la partícula, la doble capa eléctrica, también denominada *capa compacta* (Francisco Javier Pérez de la Cruz, s. f.). Los iones negativos se aproximan a la capa compacta y atraen iones positivos; el continuo movimiento de las moléculas de agua impone la existencia de la *capa difusa* de cargas eléctricas que se extienden hacia el seno del agua, que engloba a la primera (Barrenechea, 2009).

En realidad, la capa difusa resulta de la atracción de iones positivos, de la repulsión electrostática de iones negativos (con la misma carga de la partícula) y la difusión térmica como se observa en el prototipo de la Figura 15.

Se tiene, por tanto, una concentración elevada de iones positivos próximos a la superficie del coloide, también denominada *capa de Stern*, a partir de la cual se forma la capa difusa, en la cual la concentración de iones es menor.

Se han propuesto varios modelos para explicar la doble capa eléctrica. Quizás el modelo que explica mejor este fenómeno es el de doble capa difusa de Stern-Gouy.

En esta zona de carga neutra, de una capa difusa.

Aparecen así varias zonas que denominaremos:

a) Capa superficial del coloide (carga negativa), donde existe un potencial eléctrico denominado Potencial de Nernst

b) Capa de Stern, constituida por cargas de signo positivo atraídas, atraídas fuertemente por la superficie coloidal, donde el potencial eléctrico se denomina potencial de Stern. de Stern.

c) Capa difusa de Gouy-Chapman, constituida por el resto de iones móviles, hasta la superficie neutra del líquido.

En este modelo hay tres potenciales de interés:

1) El potencial ψ_0 en la superficie coloidal. Es un potencial eléctrico creado por la presencia del coloide en el agua, que disminuye con la distancia, a partir de la superficie del mismo, donde es máximo. Se le denomina *potencial de Nernst*.

2) El potencial (Φ), en el interior de la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa.

3) El potencial (Zeta) en el plano de cizalla.

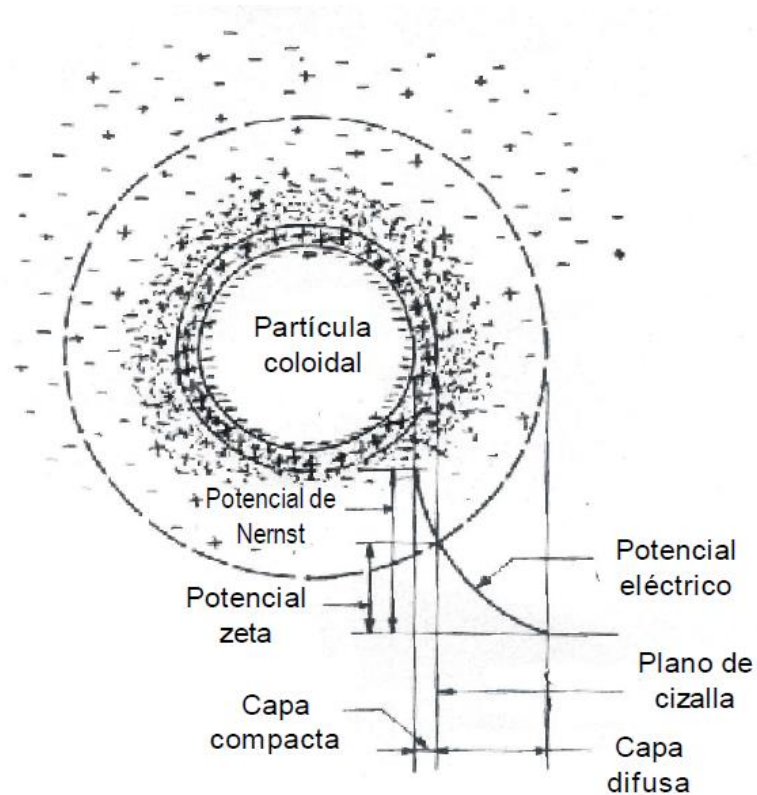


Figura 15. Modelo para explicar la doble capa eléctrica

Fuente: (Andía, 2000)

c. Barrido

Este mecanismo de coagulación de las partículas coloidales en el tratamiento del agua es controlado principalmente por la química del hidróxido de aluminio y sus especies hidrolíticas precursoras. Este tipo de coagulación se presenta normalmente cuando el agua es clara y el porcentaje de partículas coloidales es pequeño, en este caso, las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitado de hidróxido de aluminio. Debido a que la distancia entre las partículas es mayor, las fuerzas de atracción son menores y se requiere mayor cantidad de coagulante y energía para desestabilizarlas, lo que aumenta la potencial zeta y el tiempo de reacción, que puede llegar hasta 7 segundos (Barrenechea, 2009).

d. Adsorción y formación del puente

Los polímeros con carga negativa son efectivos para coagular coloides con carga negativa, fenómeno que no puede ser explicado de acuerdo con modelos basados en la neutralización de cargas. Se ha desarrollado la teoría del “puente” que, al menos, explica cualitativamente este fenómeno (La Mer y Healy, 1963; Smelle y La Mer, 1958).

En la Figura 16, se describe gráficamente la teoría de La Mer:

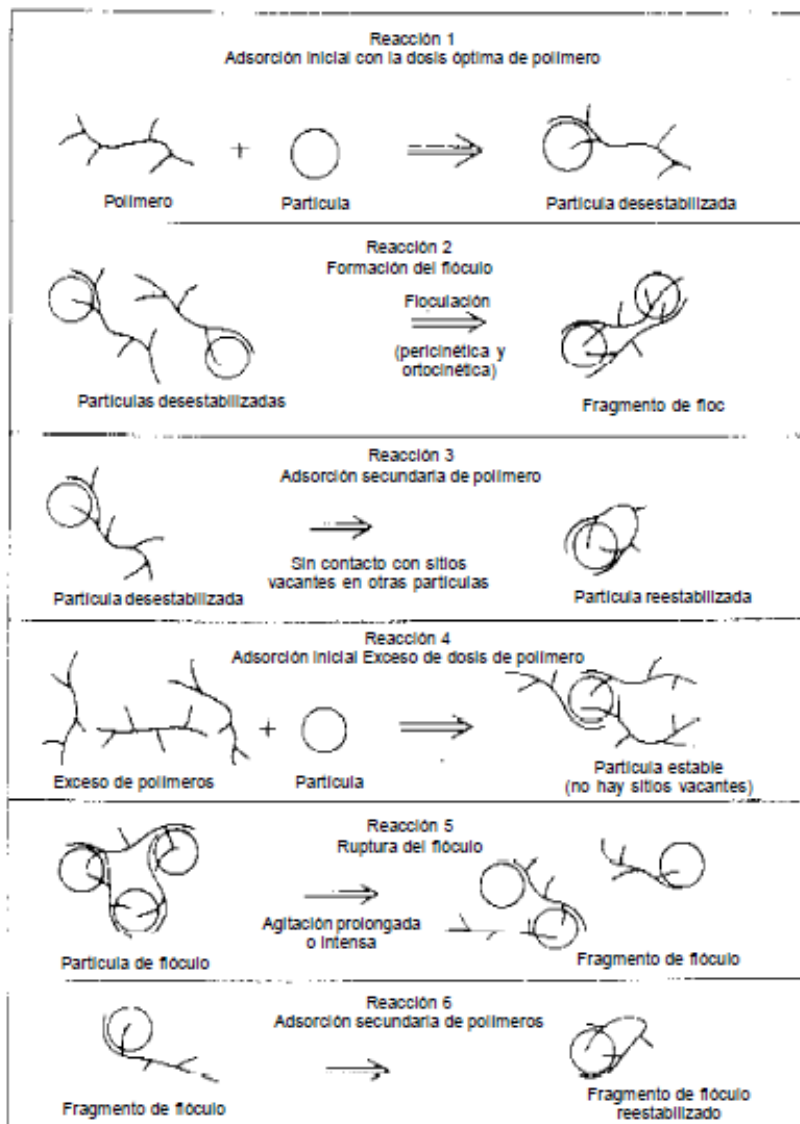


Figura 16. Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides mediante polímeros.

Fuente: (Barrenechea, 2009)

Reacción 1. Un polímero tiene ciertos grupos que interaccionan con la superficie de las partículas coloidales y se deja que el resto de la molécula se extienda hacia la solución.

Reacción 2. Si una segunda partícula con algunos sitios de adsorción vacíos entra en contacto con los segmentos extendidos, puede realizarse una unión.

El polímero sirve de puente en el complejo partícula-polímero-partícula.

Reacción 3. Si no se dispone de una segunda partícula, los segmentos dispersos del polímero pueden eventualmente adsorberse en otros lados de la partícula original, lo que hace imposible que el polímero sirva de puente y se produce la reestabilización de las partículas (Figura 17).

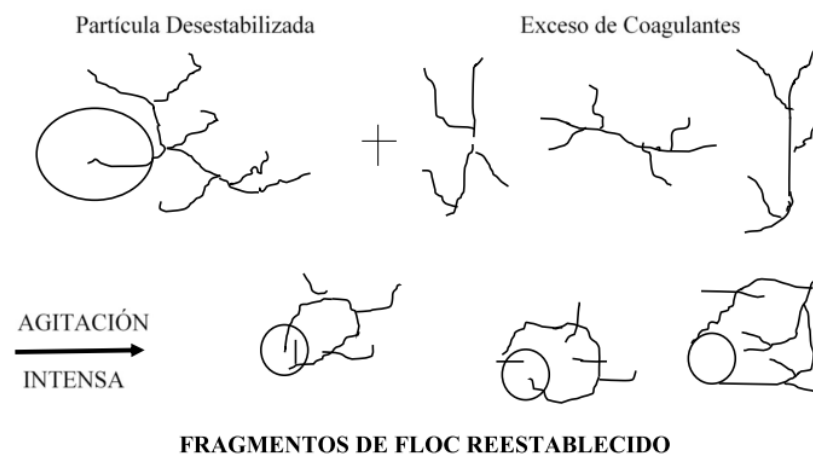


Figura 17. Reestabilización de partículas

Fuente: (Andía, 2000)

Debido a que tanto el coloide como el polímero tienen la misma carga, no se puede atribuir la reestabilización a la reversión de cargas, como en el caso de iones

Reacción 4. El modelo de puente puede explicar cualitativamente la reestabilización como resultado de la saturación de las superficies coloidales por el polímero, sin dejar lugar para la formación de puentes interparticulares.

Reacciones 5 y 6. En algunos casos, los sistemas coloidales desestabilizados pueden ser reestabilizados por medio de agitación intensa, debido a que se rompen las uniones polímero-superficie, y ocurre una adsorción secundaria de los fragmentos de los flóculos.

6.2. Sustancias usadas como coagulante

Díaz (2014) define que los coagulantes son sustancias químicas que aglutinan sólidos en suspensión en el agua, provocando su precipitación, con lo que se la aclara, se eliminan turbiedades y minerales no recomendables, todo ello aplicado en el proceso de coagulación – floculación; entre ellos se clasifican de acuerdo a naturaleza:

6.2.1. Coagulante metálico: cloruro férrico

Estos coagulantes son sales metálicas que reaccionan con la alcalinidad del agua, para producir un flóculo de hidróxido del metal, insoluble en agua, que incorpora a las partículas coloidales (Guzmán et al., 2013); es decir, cuando son disueltos, forman compuestos complejos hidratados o serie de especies solubles hidrolizadas. Los productos químicos más usados como coagulantes en el

tratamiento de las aguas son el sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato ferroso y férrico y el clorosulfato férrico (Barrenechea, 2009).

- Sulfato férrico [$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$]
- Cloruro férrico [$\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$]
- Sulfato ferroso [$\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$]

Barrenechea (2009) afirma que la coagulación mediante sales inorgánicas se produce predominantemente por medio de dos mecanismos, presentados a continuación:

1.- La adsorción de las especies hidrolíticas por el coloide, provocando la neutralización de la carga también llamado desestabilización-adsorción

2.- Coagulación de barrido, en la que se producen las interacciones entre el coloide y el hidróxido precipitado.

Cuando la cantidad de coloides presente en el agua es abundante, la distancia entre ellos es pequeña. Por lo tanto, es mayor la fuerza de atracción y la energía requerida para su desestabilización es menor, así como la potencial zeta resultante como se muestra en la siguiente Figura.

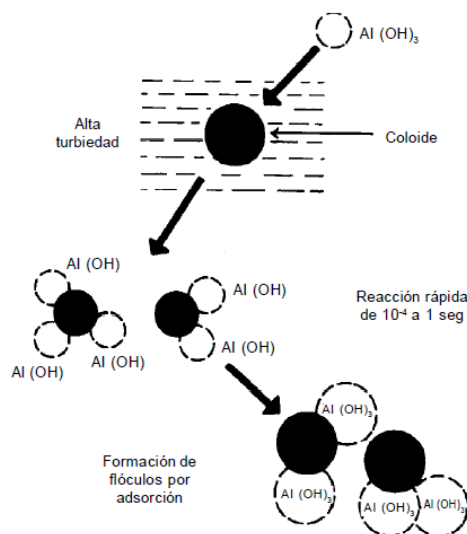


Figura 18. Proceso de coagulación de coloides por adsorción con sulfato de aluminio.

Fuente: (Barrenechea, 2009)

Se describe a continuación el cloruro férrico uno de los coagulantes metálicos más usados para el proceso de coagulación-floculación:

El cloruro férrico se presenta en forma sólida o líquida; esta última es la más utilizada en el tratamiento del agua que mediante la precipitación química se puede eliminar los sólidos en suspensión y en estado coloidal; de fórmula teórica $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ la forma sólida color pardo es cristalina, y se funde fácilmente en el agua de cristalización a 34°C , por lo que es necesario protegerla del calor; además, genera iones trivalentes de mayor peso molecular y es efectivo en amplios rangos de temperatura y pH, siendo los óptimos para éste último entre 4 - 6, y mayor a 8; en tal caso a menor pH será mayor la producción de especies de alta carga, hecho que favorece la coagulación disminuyendo la cantidad de coagulante requerida

(Guadalupe Z., 2012); una desventaja es que la formación del hidróxido férrico hará disminuir el pH del medio acuoso y aunque la precipitación se realice incluso a pH 2, para mantener el pH a niveles aproximadamente neutros, y podría ser necesario añadir hidróxido sódico al agua.

Adicionalmente los productos del hidrólisis de coagulantes metálicos cargados positivamente, neutralizan las cargas negativas de la materia orgánica y forma complejos insolubles (Zerbato et al., 2009). Y en general su efectividad alcanza valores de eliminación del 80 al 90 % de la materia total en suspensión, del 40 al 70% de la DBO, del 30 al 60 % de DQO y del 80 al 90 % de bacterias (Muñoz, 2008). Aunque su costo es menor, su manejo representa dificultades, ya que, en presencia de hierro, estas soluciones de cloruro férrico se reducen rápidamente a cloruro ferroso FeCl_2 , esta reacción explica su gran poder corrosivo frente al acero, y la necesidad de seleccionar adecuadamente el material de los recipientes de almacenamiento, de preparación y de distribución; es más usado en el tratamiento de aguas residuales que en aguas para consumo (Barrenechea, 2009). Adicionalmente la biodisponibilidad del metal en el agua depende del pH, de las relaciones y equilibrios químicos entre los distintos solutos, como silicatos, citratos, calcio y flúor; es entonces cuando el pH se encuentra en el rango entre 6 y 8, las especies químicas son altamente reactivas (García-montalvo, 2018). Tal como se ha indicado anteriormente, la formación de complejos en aguas residuales que contengan fluoruros alcalinos, tartratos, citratos, malatos y, en general, las sustancias orgánicas prehidroxiladas, inhibirán la precipitación del hidróxido.

La dispersión de los coagulantes se realiza en tres fases completamente diferentes (Gallo & Uribe, 2003):

1. Hidrólisis de los iones de Al (III) o Fe (III), esta fase se realiza en un tiempo muy corto (10^{-10} y 10^{-3} segundos).

2. Difusión de los compuestos formados y adsorción de ellos en las partículas coloidales, siendo el tiempo que puede variar de 8.5×10^{-5} y 2.4×10^{-4} segundos.

3. Polimerización o reacción de los iones hidratados para formar especies diméricas o poliméricas, con un tiempo menor de 5 segundos.

Una vez desestabilizados los coloides empiezan a aglutinarse formando primero microfloculos a los 60 segundos y luego formando partículas mayores hasta un tiempo de 550 segundos y por último se hidratan aumentando su volumen para sedimentar.

6.2.2. Polímeros naturales

Guzmán et al. (2013) define a los polímeros como sustancias complejas, compuesta químicamente por varios tipos de polisacáridos, taninos, almidón, proteínas y carbohidratos solubles en agua (Vazquez, 2007), que se producen debido a las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas de semillas, de hojas, de cortezas o savia, de raíces y de frutas, extraídos de árboles; son usados en procesos de coagulación en forma empírica por nativos para aclarar el agua turbia, con muy buenos resultados, que pueden emplearse solos o como coadyuvante de coagulantes y de floculantes químicos (Mosquera, 2014).

También Morejón (2017) afirma que los polímeros son usados por más de 4000 años en India, en África y en China, plantas nativas, como las semillas del árbol de Nirmali - *Strychnos potatorum*, granos tostados de maíz (*Zea mays*) o savia del cactus *Opuntia ficus indica*, frijol mezquite (*Prosopis juliflora*) y Cactus latifaria, en Venezuela; en Egipto y en el norte de Sudán, varios tipos de frijoles, de alverjas, de cacahuates y de lupinos, semillas de *Cassia angustifolia* y semillas de *M. oleífera*, *Quercus ilex*, *Q. suber* y *Q. robur*, el Castanea y el Pinus, “Horse chestnut” (*Aesculus hyppocastanum*), roble común (*Q. robur*), roble turco (*Q. cerris*), roble rojo norteño (*Q. ruber*) y castaña europea (*C. sativa*), extracto etanólico de semilla de uvas (GSE) y polifenoles derivados de las semillas, como ácido tánico y la catequina, *Sch. balansae* y *A. mearnsii*, maíz, yuca, papa, arroz, trigo, sagú, sorgo, araruta (Mosquera, 2014) que presentan nula toxicidad a comparación de los coagulantes sintéticos por su biodisponibilidad (Enrique et al., 2014) Algunos de estos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades (Mosquera, 2014). A ello, de acuerdo a las investigaciones de Özacar & Sengil (como se citó en Guzmán et al., 2013) han probado la capacidad coagulante y desinfectante de la *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas* (Piñón Mejicano), *Pleurotus tuberregium sclerotium* (Hongo) y *Hibiscus sabdariffa* (Rosa de Jamaica), comparándolas con el alumbre en muestras de aguas residuales.

Graham et al. (Como se citó en Guzmán et al., 2013) investigaron un polímero catiónico comercial a base de taninos (TBP), con el objeto de establecer sus propiedades químicas básicas y su comportamiento como coagulante, el mecanismo de coagulación sugerido es la desestabilización de las partículas de caolín por neutralización de cargas; la cationización de los taninos, se conoce como un procedimiento que confiere carácter catiónico a la matriz orgánica del tanino, ya que los agentes cargados positivamente pueden desestabilizar coloides aniónicos, una vez se mezclan en soluciones acuosas; la desestabilización y la sedimentación subsiguientes provocan la remoción de una amplia variedad de sustancias aniónicas, tales como colorantes, tensoactivos o materia orgánica (Gabriela & Jaramillo, 2015).

En definitiva, en la Tabla 8 se caracteriza la calidad de flóculo formado y las condiciones necesarias para el proceso de coagulación con las diferentes sustancias; y en la Figura 19 se esquematiza polímeros adsorbidos en la superficie de coloides

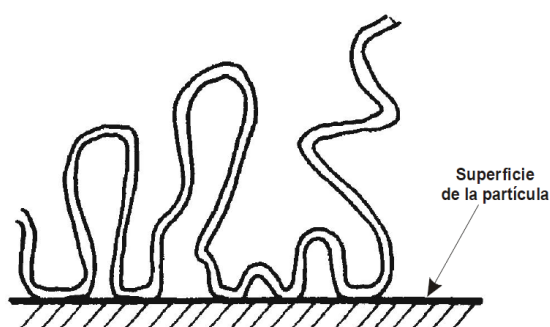


Figura 19. Esquematización de polímeros adsorbidos en la superficie de coloides

Fuente: (Barrenechea, 2009)

Tabla 8

Incidencia en las características de la coagulación – floculación al utilizar coagulantes o ayudantes.

| Clases | | Características |
|-------------------------------------|------------------------------|---|
| Coagulante | Sales de aluminio | Floc ligeramente pesado El más utilizado, es el sulfato de aluminio por su bajo costo y fácil manejo |
| | metálicos | Floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento |
| | Sales de hierro | Trabajan en un rango más amplio de pH y temperatura Los más conocidos son el cloruro férrico, sulfato férrico y ferroso |
| | Polímeros | Se necesita una cantidad excesiva La coagulación es pobre para los tiempos y gradientes de velocidad usuales |
| Ayudante de coagulación floculación | Sílice activada | Acelera la coagulación Amplía el rango de pH efectivo Flóculos más voluminosos y pesados Aumento de la eficiencia en sedimentadores |
| | Polímeros (polielectrolitos) | Compuestos de alto peso molecular (10^4 - 10^7) Aplicación en bajas concentraciones (0.01 1mg/L) y en solución para asegurar mezcla completa. Costosos |
| | | Los polielectrolitos catiónicos coagulan rápidamente a las algas |

Fuente: Arboleda (como se citó en Gabriela & Jaramillo, 2015)

7. Proceso de Floculación para el tratamiento del agua

Bravo & Gutiérrez (2015) determinan que el proceso de floculación es precedido por la coagulación, por eso se suele hablar de los procesos de coagulación-floculación que busca conseguir aguas decantadas limpias y la formación de lodos espesos, se inicia la coagulación con la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante, el cual neutralizando sus cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí; dando lugar al inicio de la floculación con la aglomeración de partículas desestabilizadas en microflóculos y después los flóculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes contruidos para este fin, denominados sedimentadores un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptima.

7.1. Tipos de mecanismos de floculación

Se precisan tres mecanismos de transporte que intervienen, en forma secuencial para el desarrollo de la floculación (Vargas, 2004):

7.1.1. Floculación pericinética o browniana

Samame V. (2016) define como el movimiento Browniano, la fuerza que se debe a la energía térmica del fluido, producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y determina que los contactos por bombardeo de las partículas producidas por el movimiento de las moléculas del líquido (movimiento browniano) que solo influye en partículas de tamaños menores a un micrón y que sólo actúa al

comienzo del proceso, en los primeros 6 a 10 seg y es independiente del tamaño de la partícula (Vazquez, 2007).

7.1.2. Floculación ortocinética o gradiente de velocidad

Este movimiento se produce en la masa del fluido inducido por una energía exterior, para crear contacto por turbulencia (Bravo & Gutiérrez, 2015), causando el impulso de las partículas a diferentes velocidades y direcciones, lo cual aumenta notablemente la probabilidad de colisión, efectivo sólo con partículas mayores a un micrón; y actúa durante el resto del proceso, de 20 a 30 minutos (Samame, 2016).

Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos, para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego la ortocinética (Vargas, 2004).

7.1.3. Sedimentación diferencial

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse, mientras el movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial; recién cuando este alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microflóculo (Díaz, 2014). Este sistema se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran (Morejón, 2017a).

8. Proceso de sedimentación para el tratamiento del agua

Brito (2007) precisa que la sedimentación es el mecanismo seguido de la coagulación - floculación y es en esencia un fenómeno netamente físico, mediante el cual las partículas suspendidas constituidos generalmente por arenas, limos y coloides se desvían por efecto gravitacional en un tiempo de retención adecuado, dependerá la manera de sedimentación de las características de las partículas, así como de su concentración; clasificándose entonces como en partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida (Samame V., 2016). Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada; se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada (Bravo & Gutiérrez, 2015).

8.1. Tipos de Sedimentación

Las partículas en suspensión sedimentan en diferentes formas, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración, Bravo & Gutiérrez (2015) lo clasifica de la siguiente manera:

8.1.1. Sedimentación de partículas discretas

Se refiere a aquellas partículas que no cambian de características como la forma, el tamaño y la densidad durante la caída (Samame, 2016).

8.1.2. Sedimentación de partículas floculentas

Brito (2007) aclara que, a diferencia de las partículas discretas, las características de forma, tamaño y densidad de este tipo de partículas si cambian durante la caída que se denomina sedimentación floculenta o decantación; procedentes de la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos.

8.1.3. Sedimentación por caída libre e interferida

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir, se denomina a este fenómeno caída libre; por otro lado, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual, y se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal (Samame, 2016).

9. Factores que intervienen en el proceso de coagulación – floculación en pruebas de Jarras

Dentro del proceso de coagulación – floculación existen factores externos que afectan el proceso, es importante hacer mención de estos, sobre todo de aquellos que deben ser controlados en la prueba de jarras; el enfoque será estudiado de acuerdo a Mosquera (2014), teniendo como factores:

9.1. Gradiente de velocidad

La velocidad en las colisiones está definida por el gradiente de velocidad, el cual es la expresión del efecto del espectro de turbulencia para un mecanismo de

agitación; y la eficiencia en las colisiones se incrementa en forma casi lineal con el gradiente de velocidad hasta que este alcanza un valor máximo, más allá del cual cualquier incremento adicional resulta en una disminución de la eficiencia, debido a que el proceso destruye el flóculo formado. El tiempo y el gradiente de velocidad son importantes al aumentar la probabilidad de que las partículas se unan y da más tiempo para que estas desciendan, por efecto de la gravedad, y así se acumulen en el fondo. Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor a un micrómetro empiecen a aglutinarse; el movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial.

9.2. Temperatura del agua

La diferencia de grados afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; como temperaturas elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación, cambia el tiempo de formación del floc, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación del floc es mayor (Díaz, 2014).

El rango de pH óptimo varía con la temperatura, y decrece al disminuir esta. En el rango de 10-40 °C Barrenechea (2009) encontró que la eficiencia era cada vez mejor al aumentar la temperatura porque se incrementaba la tasa de colisiones entre las partículas (Samame, 2016).

9.3. Dosis del coagulante

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, ante poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflóculos es muy escaso, por lo tanto la turbiedad residual es elevada; mientras que a alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada; además la cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación del floc (Bravo & Gutiérrez, 2015).

9.4. Carga de turbiedad en el agua

En tales casos, cuando la turbiedad del agua es baja, no hay suficientes partículas en suspensión para producir el contacto necesario en la formación de flóculos, que por lo contrario cuando existe una alta carga de turbiedad el contacto de aglomeración es más factible, teniendo en cuenta el tamaño de las partículas entre una y cinco micras, sirven como núcleos de floc, en cambio de diámetro superior a cinco micras, son demasiado grandes y sedimentan sin problema no siendo considerado para la coagulación (Díaz, 2014).

9.5. Concentración del coagulante

Existe mucha especulación respecto a la influencia de la concentración de solución de coagulante en la eficiencia del proceso de tratamiento; incluso se ha

sugerido limitar la concentración mínima a valores del orden de 0,5% en las estaciones de tratamiento (Samame V., 2016).

Pero tal sugerencia contradice el procedimiento usual en la realización de ensayos de laboratorio, que generalmente usan la solución de coagulante con una concentración de 0,1 y 0,2%, dependiendo del volumen de los frascos de los equipamientos de floculación (1 ó 2 litros) y de las dosis previstas para los ensayos; y la aplicación uniforme del coagulante al agua es la principal dificultad para la realización de una coagulación eficiente por el problema de que las cantidades de coagulante son muy pequeñas comparadas con el volumen de la masa de agua. Estudios realizados por Jeffcoat y Single (como se citó en Barrenechea, 2009) demostraron que las mejores condiciones para la remoción de turbiedad se producen cuando se utilizan soluciones de sulfato bastante diluidas; sin embargo, con concentraciones inferiores a 0,1% la eficiencia en la remoción de turbiedad se reduce acentuadamente, debido a que el sulfato de aluminio puede hidrolizarse antes de su aplicación (Barrenechea, 2009).

9.6. Intensidad y tiempo de mezcla

El grado de agitación que es proporcionado de forma externa por aspas en la mezcla rápida y mezcla lenta, se expresa en S^{-1} o también en revoluciones por minuto (RPM) (Mosquera, 2014); para la adición del coagulante la masa de agua debe ser uniforme e intensa, esto determina si la coagulación es completa y homogénea y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente para el desarrollo de microflóculos, por ser un factor

proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas; y por contrario, si las turbulencias fuesen desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada (Bravo & Gutiérrez, 2015).

Por ello en la mezcla rápida con polímeros los mecanismos de coagulación predominantes específicamente con los polímeros orgánicos son los de neutralización de la carga y puente interarticular. Se puede suponer que en este caso no son necesarios altos valores de gradientes de velocidad, puesto que no se producen las reacciones de adsorción en los coloides y precipitación como hidróxido, que ocurren simultáneamente durante la etapa de mezcla con coagulantes inorgánicos (Méndez, 2012).

Estudios efectuados recomiendan gradientes de velocidad de 400 a 800 s⁻¹ tiempos de retención de 60 a 30 segundos, respectivamente. Con polímeros de peso molecular bajo, se ha identificado un rango de gradiente de velocidad de 300 a 650 s⁻¹ para optimizar el proceso (Mosquera, 2014).

10. *Opuntia ficus-indica*

10.1. Descripción botánica

Enrique et al. (2014) precisa que es una planta originaria de México; tuna es el nombre común dado en Perú, Chile, Argentina, Méjico y Colombia a la planta, científicamente denominado *Opuntia ficus-indica*, proveniente de la familia *Cactaceae*. En otras partes del mundo también es conocida como Tunera, Pita,

Penca, Higuera de chumbo, Higuera de pala, Nopal, Higo de las indias, tuna de castilla, Tapia Sabra, Palma forrageira, mission cactus, se destaca porque son plantas arborescentes, arbustivas o rastreras, con forma simple o de matorrales; poseen un tronco leñoso muy definido, con ramificaciones esparcidas o en forma de copa, con tallos y ramas articuladas; y pueden llegar a medir hasta 5 m de alto (Villabona Ortiz A. , Paz Astudillo & García Martínez, 2013). Sus partes oblongas en forma de raqueta ovoide llamadas pencas o cladodios como se muestra en la Figura 20, alcanzan los 30 a 50 cm de ancho y 2 cm de espesor dependiendo del agua y de los nutrientes disponibles; el color cambia de verde claro hasta el gris o ceniza, según la edad de la planta; las espinas son cortas, débiles, blancas o amarillas; en el centro de las pencas existe una red de tejido celulósico que con el transcurso del tiempo se endurece, dándole a ésta una constitución rígida (Enrique et al., 2014). Además por las características morfológicas y fisiológicas que presenta esta planta, puede soportar condiciones ambientales desde no requerir tierras de gran calidad, pues puede crecer en terrenos poco fértiles, de textura arenosa calcáreos sueltos y arena arcillosa, poco profundos, con alto contenido de sales; pero se puede encontrar en terrenos muy someros; por el contrario su desarrollo es pobre en suelos compactos y húmedos, de preferencia con pH alcalino y de escasa humedad, los cuidados que necesitan son mínimos, se desarrolla entre temperaturas de 18°C y 27.1°C aunque pueden soportar temperaturas bajas durante periodos cortos porque se ven afectadas por las bajas temperaturas, se encuentran altitudes de 0 a 2675 metros sobre el nivel del mar y

resistencia a precipitaciones debido a su alto potencial hídrico desde 116.7 hasta 1805 millones de metros cúbicos (mmc) (Vazquez, 2007).



Figura 20. Cladodio y fruto de *Opuntia ficus-indica* a escala 1:4 y 1:1 respectivamente

Fuente: (Paucara, 2017)

10.2. Clasificación botánica

La *Opuntia ficus-indica* pertenece al género *Opuntia*, de la familia de las Cactáceas. Se han descrito hasta la fecha 125 géneros y 2,000 especies, de acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología. La nomenclatura científica de la *Opuntia ficus-indica* es la siguiente (Morejón, 2017a):

Nombre Científico: *Opuntia ficus-indica*

Reino: Plantae

Phylum: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Caryophyllales

Familia: Cactaceae

Género: *Opuntia*

Epíteto Específico: *ficus-indica*

10.3. Descripción de la composición

En investigaciones de Vazquez (2007) la *Opuntia ficus-indica* en general posee en su composición química del 60 al 95 % de agua, 11.5 % de azúcares, 1.55 % de proteínas, 3.12 % de pectinas, 0.16 % de lípidos. Su consistencia gomosa se debe además de estos polisacáridos a la presencia de triterpenos glucósidos y galactosa.

Mientras que, Enrique et al. (2014) aclara que, tanto los frutos como los cladodios de la *Opuntia ficus-indica* son una fuente importante de fibra,

hidrocoloides como mucílagos, pigmentos como las betalainas y los carotenoides, minerales entre ellos el calcio y el potasio, y vitamina C. Morejón (2017) mediante su investigación concluyó que el cladodio de la *Opuntia ficus-indica* de un mes de edad es rico en vitamina C, carbohidratos y proteínas; mientras que, el cladodio de un año de edad presenta mejores contenidos de calcio, sodio, hierro y potasio, así como de fibra, por tal motivo, las pencas jóvenes de esta planta pueden ser aprovechadas para consumo humano.

Las cactáceas al igual que todas las plantas superiores presentan un complicado proceso metabólico que da origen a la formación de muy diversos compuestos orgánicos. Para iniciar este proceso se requiere de agua, dióxido de carbono, oxígeno y otras sustancias minerales; a continuación, se describe la composición de *Opuntia ficus-indica* estudiadas por Vazquez (2007).

a. Humedad

El agua constituye el principal componente químico de las cactáceas, su contenido varía mucho entre los diferentes géneros y en cada especie cambia en correlación a la humedad del suelo y a la disponibilidad del agua en éste. Horn (como se citó en Vazquez, 2007) consigna los resultados de los análisis de humedad de un mismo nopal hechos en la estación seca, encontrando valores de 79.32 a 92.75 %, donde la variación se les atribuye a las condiciones de terreno donde fueron colectados.

b. Sales minerales

La composición mineral de las cenizas de las cactáceas es muy variable no tan solo entre las distintas especies, sino que también dentro de una misma, ya que depende, en parte de la composición química del suelo y de los complicados fenómenos de la disponibilidad de ellos para la planta relacionados con la acidez, salinidad, conductividad, grado de disociación o ionización, humedad y textura de los suelos. De las cactáceas, las plantas mejor estudiadas desde el punto de vista del análisis de sus cenizas, son los nopales y esto se debe a su posible uso como alimento, y se encontró que los componentes principales de las cenizas son calcio y potasio, encontrándose también algo de magnesio, sílice, sodio y pequeñas cantidades de fierro, aluminio y manganeso, predominando en forma de carbonatos, aunque también se encuentran como cloruros, sulfatos y pequeñas cantidades de fosfatos.

c. Néctares

Los néctares son sustancias exudadas por órganos especializados de las cactáceas; éstos líquidos son una mezcla de sacáridos que a veces probablemente contengan ligeras cantidades de aceites esenciales, sobretudo, los producidos en la flor.

d. Almidón

El almidón constituye la principal reserva nutritiva hidrocarbonada de las plantas superiores; y en las cactáceas se le encuentra en raíces, tallos y algunas

semillas bajo la forma de diminutos granos cuyo aspecto y dimensiones varían según las diversas especies Vazquez (2007).

e. Celulosa

La celulosa es el componente principal de la pared celular de los vegetales; el contenido de celulosa en las cactáceas varía considerablemente entre las diversas especies, y los resultados de análisis de nopales sobre el contenido de fibra cruda, que es una mezcla de celulosa y lignina, son valores que oscilan entre 11.75 a 37.34% según Fernández Landero (como se citó en Vazquez, 2007).

f. Gomas

Frecuentemente las cactáceas que sufren algún daño físico, como la perforación del tallo, comienza a exudar gomas que está formado por ácido D-galactourónico, y carbohidratos como L-arabinosa, D-xilosa, D-galacosa y L-ramnosa (Méndez et al., 2012).

g. Mucílagos o hidrocoloides

Los mucílagos son sustancias análogos por su composición y propiedades a las gomas que están contenidos dentro de las grandes células vesiculares de los parénquimas; en contacto con el agua forman unas dispersiones viscosas como una pseudodisolución gelatinosa y poseen una enorme facilidad de embeberla o absorber; propiedad de suma importancia en el mecanismo de retención del agua de las cactáceas (Carhuamaca, 2013).

Fernández Landero (como se citó en Vazquez, 2007) encontró en seis muestras de dos nopales, un contenido de mucílago que fluctúa entre 1.09 a 4.53

%, y en el análisis del mucílago obtenido de *O. ficus-indica* se demostró que está compuesto por glucosa y arabinosa, principalmente, mientras que los azúcares encontrados en el mucílago de *O. tomentosa* fueron glucosa, arabinosa y galactosa.

Por otro lado Guzmán et al. (2013) estudio la composición del mucílago, que son sustancias poliméricas complejas de naturaleza carbohidrato, con una estructura altamente ramificada, que contiene proporciones variables de L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa, así como ácido galacturónico en diferentes proporciones el cual, forma redes moleculares que pueden retener grandes cantidades de agua; su estructura, se propone como dos fracciones distintas solubles en agua: una pectina, con propiedades gelificantes, y, la otra, un mucilago sin propiedades gelificantes.

Morejón (2017) también desarrolló una investigación acerca del mucílago de la *Opuntia ficus-indica* y lo define como una sustancia gelatinosa consistente y compleja, por la capacidad de formar redes moleculares, es un biopolímero que contiene polisacáridos similares a las pectinas que permiten el encapsulamiento y la separación de los sólidos disueltos del agua; que por sus propiedades se la ha empleado en diferentes aplicaciones dentro de la industria alimenticia, farmacéutica, cosmética, construcción, en el sector energético, agroindustrial y en la industria de aditivos naturales. Asimismo Carhuamaca (2013) coincide que por el porcentaje de polisacáridos los mucílagos producen coloides muy poco viscosos, que presentan actividad óptica y pueden ser hidrolizados y fermentados; en cambio las gomas se hinchan en el agua para dar dispersiones coloidales gruesas y las

pectinas se gelifican; y añade las propiedades del mucílago como la capacidad muy alta para formar geles, debido a su compleja estructura molecular y a su gran capacidad de hidratación hasta un 80 % de incremento en peso, aumentar su volumen y desprenderse de la corteza al ponerse en contacto con un líquido, alta capacidad complejante que es la responsable de la retención de los iones metálicos, gran capacidad biodegradable, a diferencia de muchos compuestos coagulantes sintéticos y una mínima toxicidad en polímeros naturales por lo que se les usa en muchos casos como alimentos o aditivos en diversos productos porque modifica sus propiedades funcionales como la viscosidad, elasticidad, retención de agua, poder gelificante y espesante. Garti 1999 (Como se citó en Silvia, 2017) añade propiedades del mucílago como la estabilización de emulsiones del tipo aceite-agua, reduce la tensión superficial e interfacial, absorbe hacia la interface aceite-agua y no contribuye a la viscosidad de los sistemas.

León (2010) muestra en su averiguación las estructuras de los mucílagos en las micrografías (Figura 21) dos diferentes magnificaciones donde se aprecia que la superficie es altamente porosa que son producto del paso del agua al momento de la sublimación.

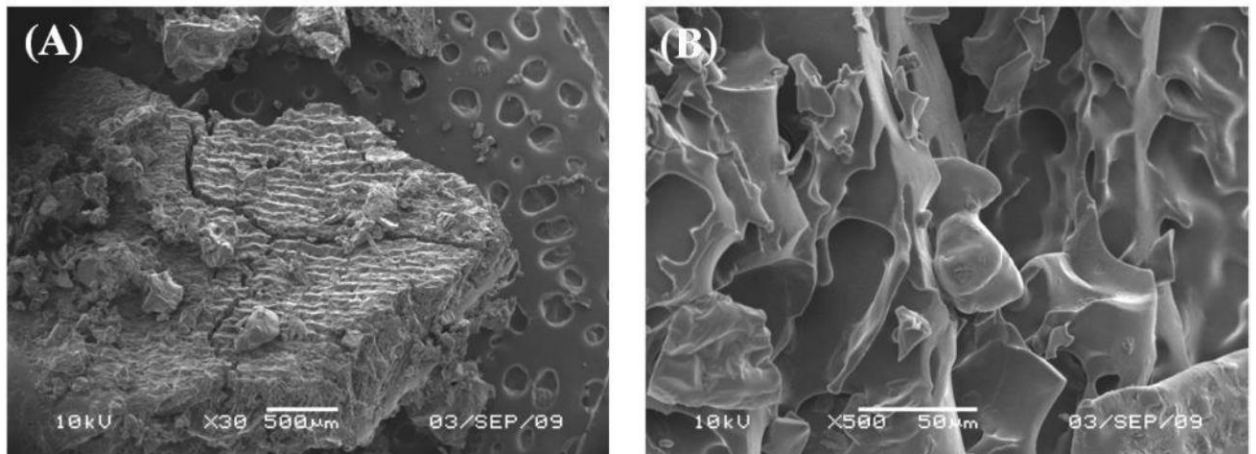


Figura 21. Micrografías de mucílago donde se muestra su estructura porosa

Fuente: (León, 2010)

En la Figura 22, se muestra las micrografías donde el mucílago se encuentra hidratado, mostrando una estructura lisa, abultada y agrupadas entre sí, producto de la adsorción de agua teniendo menos sitios activos para la sorción lo cual es limitada.

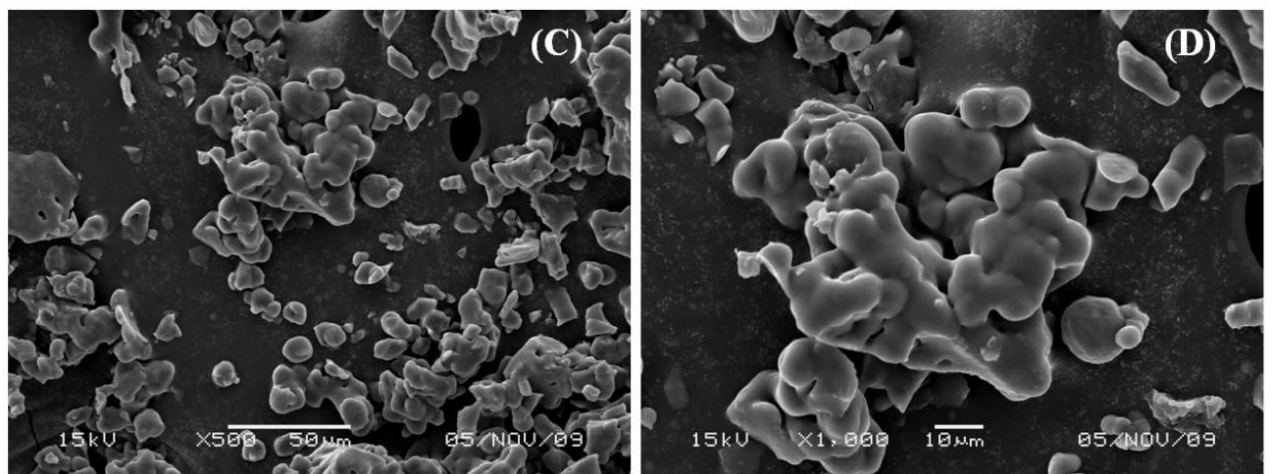


Figura 22. Micrografías de mucílago en estado de hidratación

Fuente: (León, 2010)

10.4. Importancia ecológica de uso de mucílago como coagulante

El mucílago tiene alta capacidad para formar geles, debido a su compleja estructura molecular y capacidad de hidratación, hasta un 80% de incremento en peso, además de la alta capacidad complejante que es la responsable de la retención de los iones metálicos y remoción de microorganismos presentes en el agua cruda; capacidad biodegradable y no tóxico, a diferencia de muchos compuestos coagulantes sintético; reducción en el consumo de coagulantes primarios, reducción en el volumen de lodo sedimentado en el decantador; eficiencia en la desinfección, debido a la reducción de sólidos suspendido en el agua filtrada siendo en algunos casos, la reducción de costos (Morejón, 2017a); en investigaciones de Andrade & Tipán (2016) afirman que cuenta con un potencial bactericida, cuya aplicabilidad viene desde años atrás, también acción efectiva al remover arsénico que es perjudicial para la salud del hombre, un problema en las zonas mineras donde se extrae oro. En conclusión, cabe destacar la importancia de este sistema de uso de coagulantes-floculantes naturales que se logra disminuir los niveles de estos contaminantes, ya que es una tecnología biodegradable y amigable con el medio ambiente además de reducir la contaminación que provocan las aguas no tratadas, donde habrá una restauración ecológica del agua y proporcionará una alternativa sustentable.

Por otro lado, Gabriela & Jaramillo (2015) estudiaron referente a los lodos residuales producto en el uso de este sistema, donde resumieron que existe un beneficio ambiental en la reducción de su toxicidad, generando bienestar en la biota

y fauna expuesta; además, un beneficio económico en la reducción de costos de manejo y disposición final del lodo, al no tener sustancias tóxicas que tratar; además del aprovechamiento de los residuos orgánico, que constituyen el 61% del total de residuos sólidos en el país, resulta inevitable pensar en prolongar la vida útil de rellenos sanitarios, reducir la emisión de metano, evitar la apertura de nuevos rellenos sanitarios, entre otros beneficios, teniendo como punto de partida la viabilidad de los coagulantes/floculantes naturales y su incidencia tóxica en los lodos residuales.

Curran (2008) señala que los futuros efectos podrían incluir la generación de componentes químicos en cantidades elevadas que resultarían tóxicas para los humanos o animales que viven en dichos medios acuáticos.

El segundo componente, la ecotoxicidad terrestre y acuática refleja la contribución de sustancias que afectan la salud humana, la flora y fauna en diferentes ambientes. Las sustancias que ocasionan este efecto son los metales pesados, los contaminantes orgánicos persistentes y los componentes orgánicos volátiles (Goedkoop et al. 2009).

Otro impacto, la toxicidad humana se refiere a la persistencia en el tiempo de un elemento, acumulación en cadena humana alimenticia, y la posibilidad de generar efectos secundarios en la salud humana. La unidad que utiliza es 1,4-Diclorobenzeno (14DCB) (Goedkoop et al. 2009).

Capítulo 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se desarrolló en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión, ubicada en el Km 19.5 de la carretera Central, Ñaña, Lurigancho-Lima. El proceso de pruebas tendrá un periodo de setiembre hasta noviembre del 2018 para su ejecución.

3.2. Materiales e insumos

Entre los materiales e insumos están:

3.2.1. Materia Prima

Para las pruebas experimentales a escala laboratorio fue usado como coagulantes diferenciados por su naturaleza química (cloruro férrico) y polímero natural (mucílago de *Opuntia ficus-indica*), y ésta última de acuerdo al método de extracción fue en dos estados, líquido y sólido (en polvo).

Para la muestra de agua a tratar se obtendrá a partir de la mezcla con sedimento del canal hasta llegar a los tres niveles de evaluación de turbidez (Alta con 400 UNT, media de 280 UNT y baja de 60 UNT).

3.2.2. Reactivos

- Cloruro férrico en solución FeCl 0.5% a 10 %
- Mucílago de *Opuntia ficus-indica*
- Agua destilada

3.2.3. Materiales y equipos

- Equipo de prueba de jarras de 6 reactores marca LOVIBOND ET750
- Turbidímetro de mesa HANNA HI-88703
- pH-metro HANNA HI-9025C
- Cilindro de 50 litros
- Cilindros de 20 litros para muestreo del sobrenadante de suspensión
- Vasos precipitados de 2000 mL, 100 mL y 50 mL
- Probetas milimetradas de 100 mL
- Deflectores para vasos precipitados de 2000 mL
- Erlenmeyer de 100 mL
- Fiolas de 1000 mL, 100 mL y 25 mL
- Pipeta de 10 mL
- Sifones de vidrio de 8 a 10 cm
- Ligas
- Jeringas hipodérmicas desechables con aguja de 10mL

3.3. Variables de estudio

Se estudiaron las siguientes variables:

- **Variable dependiente:**

La turbidez residual de las muestras de las muestras obtenidas luego del proceso de coagulación - floculación.

- **Variable independiente:**

- Tipo de coagulante: cloruro férrico, mucílago de *Opuntia ficus-indica* líquido y en polvo.
- Nivel de turbidez: Alta de 400 UNT, media de 280 UNT y baja de 60 UNT.

- **Constantes**

Se han mantenido variables constantes a lo largo de los ensayos de laboratorio diferenciando dos escenarios: para coagulante químico (cloruro férrico) y otras constantes para polímero natural, las que se presentan a continuación:

- **Coagulante Cloruro férrico**
 - pH: 7 unidades de pH
 - Mezcla rápida: 5 segundos
 - Tiempo de floculación 20 min
 - Tiempo de sedimentación 20 min
 - Gradiente de mezcla rápida 300 RPM
 - Gradiente de floculación 40 RPM
 - Gradiente de sedimentación 0 RPM
 - Volumen de agua de agua 2 litros de agua por jarras
- **Coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica***
 - pH: 7 unidades de pH
 - Mezcla rápida: por 1 min
 - Tiempo de floculación 20 min

- Tiempo de sedimentación 20 min
- Gradiente de mezcla rápida 100 RPM
- Gradiente de floculación 40 RPM
- Gradiente de sedimentación 0 RPM
- Volumen de agua 2 litros de agua por jarras

4. Métodos

4.1. Métodos de extracción de coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica*

Morejón (2017) desarrolló un método para la extracción del mucílago para el uso de coagulante de *Opuntia ficus-indica*; donde describe que recolectó 4 paletas o cladodios de *Opuntia ficus-indica* jóvenes de aproximadamente 1 año de vida, del terreno aledaño a la planta potabilizadora de agua de la comunidad de Pusir; la selección de estos cladodios fue de manera manual y en función del tamaño, grosor y aspecto salubre, de acuerdo a la metodología empleada, luego se trasladaron al laboratorio de Agro-calidad para realizar el respectivo análisis del tejido vegetal y mucílago.

Por otro lado, Quispe (2013) y Vazquez, (1994) coinciden en el desarrollo de la metodología con el que se realizó ensayos variando la relación volumétrica mucílago-agua, la que se compone por los procesos de limpieza, corte, licuado, macerado de 12 horas y tamizado.

Guardado y Hernández (2017) estudiaron la efectividad de floculantes naturales de cladodio de *Opuntia ficus-indica* y Semilla de tamarindo en el

tratamiento de aguas residuales provenientes de lavandería industrial; para ello aplicaron la metodología de extracción consistente en la reducción de tamaño sin corteza, secado a 120°C durante 6 horas y otras 6 horas a 60°C, trituración hasta obtener material menor a 0.5 mm y finalmente se tamiza; obteniéndose un producto amarillo verdoso, para ello se hace una extracción de pigmentos con el equipo Soxhlet durante 6 horas con solvente etanol al 99%, y para eliminar el solvente se colocó en la estufa a 60°C por 30 min, hasta obtener un producto final color marfil. En la prueba de jarras las variables fueron dosis del coagulante a 5, 6 y 9 ml; pH a 5, 6 y 7; y tiempo de agitación de 10, 20 y 30 min. Como conclusión se obtuvo que la mayor remoción sucede bajo las condiciones de 30 ml/L de dosis, pH 5, agitación rápida 1 min y lenta a 20 min; además se reporta que con la adición de este coagulante el pH final de la muestra es de 5.9. y se llevó a ebullición durante 1 hora para facilitar la extracción del mucílago de la fibra, así como para evitar la acción enzimática que degrada a los componentes del mucílago

4.2. Método de Prueba de Jarras

Para el proceso de coagulación-floculación es necesario determinar la cantidad del coagulante a agregar al agua, para ello se tiene que hacer un ensayo conocido como “Jar Test” o Test de Jarras (Morejón, 2017a).

La prueba de jarras es un procedimiento común de laboratorio para determinar las condiciones óptimas. Este método permite realizar ajustes en las variaciones en la dosis de coagulante o polímero, alternando velocidades de mezclado a pequeña escala, con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a mayor escala

de tratamiento. Una prueba de jarras simula los procesos de coagulación y floculación que fomentan la eliminación de los coloides en suspensión y materia orgánica que puede conducir a problemas de turbidez, olor y sabor (Abramovich, y otros, 2004).

Mientras que Bravo & Gutiérrez (2015) lo define como un método de simulación de los procesos de coagulación y floculación, realizado a nivel de laboratorio que permite obtener agua de buena calidad, promoviendo la remoción de coloides suspendidos y materia orgánica; este procedimiento permite determinar las condiciones de operación óptimas para el tratamiento de aguas, ya que permite hacer ajustes en el pH, variar dosis de coagulantes y floculantes y alternar velocidades de agitación.

El aparato de prueba de jarra contiene seis remos que remueven el contenido de seis envases o vasos, mismos que deben ser de 2 litros (L), preferentemente, se debe evitar usar vasos más pequeños, debido a la dificultad de obtener precisión en la dosificación de pequeños volúmenes de coagulantes. Un envase actúa como un control, mientras que la condición de funcionamiento puede variar entre los restantes cinco contenedores. Presenta un medidor de revoluciones por minuto (RPM) el cual permite el control uniforme de la velocidad de mezclado en todos los contenedores (Samame V., 2016).

4.3. Método para la evaluación de la eficiencia

Bravo & Gutiérrez (2015) establecen la fórmula para la evaluación de la eficiencia de remoción de turbiedad en el agua con tratamiento físico - químico

coagulación – floculación; que serán determinados por la turbidez inicial y final, como se muestra en la Ecuación 1.

$$\text{Eficiencia de remoción} = \frac{(\text{Turbidez inicial} - \text{Turbidez final})}{\text{Turbidez inicial}} \times 100 \dots \text{Ecuación 1}$$

5. Procedimiento

5.1. Análisis de parámetros del agua

En la Tabla 9 se detallan los métodos de análisis de cada parámetro de agua que se realizará en el laboratorio e *in-situ*.

Tabla 9

Métodos de análisis a parámetros químicos

| Parámetro | Unidad de medida | Método de análisis |
|---|------------------|----------------------|
| Análisis de parámetro <i>in-situ</i> | | |
| pH | Unid. pH | pH-metro HANNA |
| Temperatura | °C | Multiparámetro HANNA |
| Oxígeno disuelto | ppm | Multiparámetro HANNA |
| Sólidos totales disueltos | mg/L | Multiparámetro HANNA |
| Conductividad eléctrica | µs/cm | Multiparámetro HANNA |
| Turbiedad | UNT | Turbidímetro HANNA |

5.2. Diseño e implementación de las pruebas de tratabilidad a escala piloto

Para determinar los parámetros óptimos para la remoción de turbiedad con coagulante natural de *Opuntia ficus-indica* y químico cloruro férrico; se

desarrollará de acuerdo a la metodología descrita por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS). La prueba de jarras es un método a escala de laboratorio donde se evaluará la suspensión de sólidos disueltos, coloides y otras partículas no sedimentables por gravedad mediante un proceso de coagulación-floculación, permitirá conocer el efecto que tiene sobre la condición del agua estudiada con la solución acuosa; se desarrollará con el equipo marca LOVIBOLD ET 750, que posee seis reactores independientes de 2000 mL de capacidad cada uno.

5.3. Preparación de la muestra de agua

Se obtendrá una muestra de agua representativa con suspensión de muestra de sedimento del ingreso del canal de riego al Campus, muestreo basado en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM y la Guía de calidad de agua OMS; el procedimiento consiste en dejar reposar durante 1 hora para que sedimente el material arenoso y trabajar únicamente con material coloidal, enseguida en tres cilindros de plástico con capacidad de 150 litros cada uno, se homogeniza hasta obtener los tres niveles de turbiedad 400, 280 y 60 UNT un margen de error de +- 10 UNT, será medida con un Turbidímetro marca HANNA HI-88703, adicionalmente se realizará mediciones de pH y temperatura del agua.

Los reactivos utilizados para los ensayos de jarras serán el cloruro férrico, coagulante natural de *Opuntia ficus-indica*. A continuación, se detalla la preparación de éstos:

5.3.1. Solución de cloruro férrico

El reactivo viene en presentación líquida de concentración al 100% y densidad aparente 1.43 gr/cm³. Se realizó las siguientes diluciones:

La solución patrón se obtuvo a partir de la utilización del reactivo principal de concentración 100%, añadiendo 100 mL del coagulante hasta completar el volumen de 1000 mL de un matraz con agua destilada, con lo que se obtendrá una solución de 10% que se puede conservar por 15 días.

Para la dilución en otras concentraciones a partir de la solución patrón se usó la Ecuación 2:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \dots\dots\dots Ecuación 2$$

donde:

C: Concentración

V: Volumen

A. Preparación para prueba de dosis óptima con coagulante cloruro férrico

Para esta prueba se siguió la configuración de la Tabla siguiente:

Tabla 10

Configuración para la prueba de dosis óptima con coagulante cloruro férrico a tres diferentes niveles de turbiedad

| Ensayo de dosis óptima con coagulante cloruro férrico por nivel de turbiedad | | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Turbiedad Alta: 400 UNT | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Concentración (%) | 1% | | | | | |
| Dosis (mg/l) | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 55 |
| Turbiedad Media: 280 UNT | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Concentración (%) | 1% | | | | | |
| Dosis (mg/l) | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 |
| Turbiedad Baja: 60 UNT | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Concentración (%) | 1% | | | | | |
| Dosis (mg/l) | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |

La solución de cloruro férrico en concentración al 1% se realizó diluyendo 10 mL de la solución patrón en un matraz hasta completar a 100 mL con agua destilada, queda una solución al 1%, lo cual no se puede conservar más de 24

horas, pues corre el riesgo de hidrolizarse y perder buena parte de su capacidad de coagulación.

Cálculos para la obtención de la cantidad a agregar a cada jarra, en base a la dosis y concentración del coagulante, mediante la Ecuación 3.

$$q = \frac{D \cdot Q}{C} \dots \dots \dots \text{Ecuación N 3}$$

donde:

- q: Volumen de solución por aplicar (ml)
- D: Dosis de coagulante (mg/L)
- Q: Capacidad de la jarra en (L)
- C: Concentración de la solución (mg/L)

Enseguida se extrajo las cantidades en ml de la solución de concentración al 1%; donde se vierten cada cantidad extraída en vasos precipitados de 50 mL, los cuales fueron succionados por jeringas hipodérmicas desechables respectivamente.

Las condiciones de mezcla en el equipo de prueba de jarras fueron como se indica en la Tabla 11.

Tabla 11

Configuración de condiciones de mezcla en el equipo de prueba de jarras.

| Condiciones de mezcla para la prueba de Jarras con coagulante cloruro férrico | | |
|--|-------------------------------------|--------------|
| Mezcla rápida | Velocidad (RPM) | 300 RPM |
| | Gradiente de velocidad (S^{-1}) | 600 S^{-1} |
| | Tiempo (seg) | 5 seg |
| Mezcla lenta | Velocidad (RPM) | 40 RPM |
| | Gradiente de velocidad (S^{-1}) | 70 S^{-1} |
| | Tiempo (min) | 10 min |
| Sedimentación | Velocidad (RPM) | 0 RPM |
| | Gradiente de velocidad (S^{-1}) | 0 S^{-1} |
| | Tiempo (min) | 20min |

B. Preparación para prueba de concentración óptima con coagulante cloruro férrico

Para esta prueba se siguió la configuración de la Tabla siguiente:

Tabla 12

Configuración para la prueba de concentración óptima con coagulante cloruro férrico

| Ensayo de concentración óptima con coagulante cloruro férrico para los tres niveles de turbiedad | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Turbiedad: 400, 280 y 60 UNT | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/l) | * | | | | | |
| Concentración (%) | 1 | 3 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| Cantidad (ml) | | | | | | |

* Dosis determinada por el ensayo de prueba de dosis óptima

La solución de cloruro férrico en concentración al 1% se realizó diluyendo 10 mL de la solución patrón en un matraz hasta completar a 100 mL con agua destilada, queda una solución al 1%, lo cual no se puede conservar más de 24 horas, pues corre el riesgo de hidrolizarse y perder buena parte de su capacidad de coagulación.

Cálculos para la obtención de la cantidad de acuerdo a la dosis y concentración del coagulante, se analizaron mediante la Ecuación 3.

$$q = \frac{D \cdot Q}{C} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

donde:

- q: Volumen de solución por aplicar (ml)
- D: Dosis de coagulante (mg/L)
- Q: Capacidad de la jarra en (L)
- C: Concentración de la solución (mg/L)

Enseguida se extrajeron las cantidades determinadas y se vierten cada cantidad extraída en vasos precipitados de 50 mL, los cuales fueron succionados por jeringas hipodérmicas desechables respectivamente. Las condiciones de mezcla en el equipo de prueba de jarras fueron como se indica en la Tabla 15.

5.3.2. Solución de coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica*

Se plantea la prueba con dos tipos de metodología de extracción de mucílago, la primera es en estado líquido y se desarrolló de acuerdo a la metodología planteada por Quispe (2013), en la que se emplea el mucílago de manera líquida; mientras que la segunda es en estado sólido (en polvo) de acuerdo a la metodología planteada por Guardado y Hernández (2017).

El método de extracción de mucilago por maceración que se realizó fue de acuerdo a Quispe (2013) como se muestra en la Figura 23; el mismo que inició con la recolección de una paleta o cladodio de *Opuntia ficus-indica* joven de aproximadamente 1 año de vida, que será lavado con abundante agua, se retiran las espinas y la cutícula, de las que por cada 320 gr del peso total de la paleta se consiguió 280gr de pulpa y 40 gr de despojos relación de 7:1 aproximada; luego, el material será cortado en pequeños segmentos de distintos tamaños, y para la

determinar la concentración de disolución que se expresa con la relación entre la cantidad de soluto y la cantidad de solvente que fue agua destilada, de acuerdo a la siguiente Ecuación 4:

$$\% \text{ en peso} = \frac{\text{Peso de soluto (g)}}{\text{Disolvente (ml)}} \times 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 4}$$

Para la obtención de una concentración de 5% se licuó 50 g de mucílago con 1000 ml de agua destilada, se dejará esta mezcla para el proceso de macerado durante 20 horas a temperatura ambiente, a fin de favorecer la dilución del gel contenido en los cladodios de la *Opuntia ficus-indica* formando un complejo coloidal con el agua; finalmente al obtener el extracto acuoso de la relación volumétrica mucílago-agua, que se filtró a través de un tamiz de 1mm y gasa, con el fin de conseguir una solución acuosa limpia y sin presencia de grumos, siendo ésta el coagulante - floculante natural.



Figura 23. Proceso de extracción de mucílago por maceración. Adaptación Quispe (2013)

Para la obtención de coagulante de mucílago en polvo fue basado en la metodología de Guardado y Hernández (2017) y se muestra en la Figura 24; en que se realiza la reducción de tamaño sin corteza, secado a 120°C durante 6 horas y otras 6 horas a 60°C, trituración hasta obtener material menor a 0.5 mm y finalmente se tamiza; obteniéndose un producto amarillo verdoso, se omitió la

extracción de pigmentos para este estudio; asimismo se adicionó el proceso de maceración a este método; se realizó la maceración antes del proceso de secado, durante 18 horas con agua destilada en relación 1:1; y en el momento de ser diluido agua destilada al 10%, para ser empleado en el procedimiento de coagulación, se realizó la maceración por 18 horas.



Figura 24. Proceso de extracción de mucilago en polvo. Adaptación Guardado y Hernández (2017)

A. Preparación para prueba de dosis óptima con mucílago de *Opuntia ficus-indica*

Para esta prueba se plantean condiciones de dosis para ambos métodos de extracción (macerado y polvo) se siguió la configuración de la Tabla 13 siguiente:

Tabla 13

Configuración para la prueba de dosis óptima para coagulante con mucílago de Opuntia ficus-indica en polvo y líquido, a diferentes niveles de turbiedad.

| Ensayo de dosis óptima con coagulante mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> por nivel de turbiedad | | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Turbiedad Alta: 400 UNT | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Concentración (%) | 5% | | | | | |
| Dosis (mg/l) | 35 | 38 | 40 | 42 | 45 | 47 |
| Turbiedad Media: 280 UNT | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Concentración (%) | 5% | | | | | |
| Dosis (mg/l) | 20 | 24 | 27 | 30 | 33 | 35 |
| Turbiedad Baja: 60 UNT | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |

| | | | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|
| Concentración (%) | 5% | | | | | |
| Dosis (mg/l) | 14 | 16 | 18 | 20 | 24 | 26 |

UNT: Unidades nefelométricas de turbidez

Para determinar las cantidades de coagulante por aplicar se relacionan la dosis y concentración, mediante la Ecuación N°2.

$$q = \frac{D \cdot Q}{C} \dots \dots \dots \text{Ecuación N° 2}$$

donde:

- q: Volumen de solución por aplicar (ml)
- D: Dosis de coagulante (mg/L)
- Q: Capacidad de la jarra en (L)
- C: Concentración de la solución (mg/L)

Enseguida se extrajo las cantidades en mL por cada jarra de 2 litros, de la solución de concentración al 5%; los que se vierten en vasos precipitados de 50 mL, los cuales fueron succionados por jeringas hipodérmicas desechables respectivamente.

Las condiciones de mezcla en el equipo de prueba de jarras fueron como se indica en la Tabla siguiente:

Tabla 14

Configuración de condiciones de mezcla en el equipo de prueba de jarras para coagulante de mucílago

| Condiciones de mezcla para la prueba de Jarras con coagulante mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> | | |
|--|-------------------------------------|--------------|
| Mezcla rápida | Velocidad (RPM) | 100 RPM |
| | Gradiente de velocidad (S^{-1}) | 190 S^{-1} |
| | Tiempo (seg) | 5 seg |
| Mezcla lenta | Velocidad (RPM) | 40 RPM |
| | Gradiente de velocidad (S^{-1}) | 70 S^{-1} |
| | Tiempo (min) | 10 min |
| Sedimentación | Velocidad (RPM) | 0 RPM |
| | Gradiente de velocidad (S^{-1}) | 0 S^{-1} |
| | Tiempo (min) | 20 min |

B. Preparación para prueba de concentración óptima con mucílago de *Opuntia ficus-indica*

Para esta prueba se siguió la configuración de la Tabla siguiente:

Tabla 15

Configuración para la prueba de dosis óptima con mucílago de Opuntia ficus-indica

| Ensayo de concentración óptima con coagulante mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> para los tres niveles de turbiedad | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Turbiedad: 400, 280 y 60 UNT | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/l) | * | | | | | |
| Concentración (%) | 1 | 3 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| Cantidad (ml) | | | | | | |

* Dosis determinada por el ensayo de prueba de dosis óptima

Cálculos para la obtención de la cantidad de acuerdo a la dosis y concentración del coagulante, se analizaron mediante la Ecuación 3.

$$q = \frac{D \cdot Q}{C} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

donde:

- q: Volumen de solución por aplicar (ml)
- D: Dosis de coagulante (mg/L)
- Q: Capacidad de la jarra en (L)
- C: Concentración de la solución (mg/L)

Enseguida se extrajeron las cantidades determinadas y se vierten cada cantidad extraída en vasos precipitados de 50 mL, los cuales fueron succionados por jeringas hipodérmicas desechables respectivamente. Las condiciones de mezcla en el equipo de prueba de jarras fueron como se indica en la Tabla 14.

5.4. Tamaño y tiempo de formación de flóculo

Durante los ensayos de prueba de dosis y concentración óptima se realiza el análisis visual para determinar el tamaño de flóculo mediante la Figura 25 desarrollada por Water Research Institute of England WRA y el tiempo en el que se inicia la formación por cada jarra se determina en segundos para cuantificar la velocidad de reacción a la adición del coagulante, de acuerdo a la Tabla 16 de índice de Willcomb, escogiendo la de mayor tamaño; sin embargo, no siendo determinante esta prueba para acertar en que será el de mayor velocidad de asentamiento (Vargas, 2004).

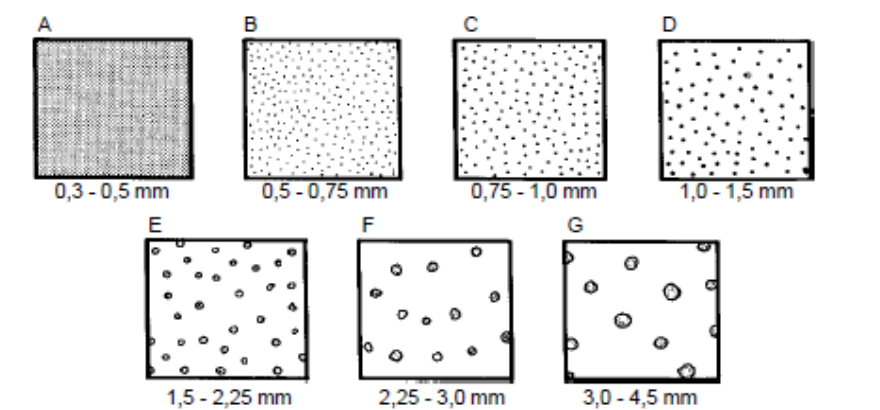


Figura 25. Guía para estimar el tamaño del flóculo formado en el proceso de coagulación, según WRA (Vargas, 2004)

Tabla 16

Índice de floculación de Willcomb

| Número del índice | Descripción |
|-------------------|---|
| 0 | Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación. |
| 2 | Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado. |
| 4 | Disperso. Flóculo bien formado pero uniforme en distribución (sedimenta o no muy lentamente). |
| 6 | Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud. |
| 8 | Bueno. Flóculo que se deposita pero no completamente. |
| 10 | Excelente. Flóculo que se deposita lentamente, dejando el agua cristalina. |

Fuente: (Vargas, 2004)

5.5. Gradientes de velocidad

Para determinar las gradientes de velocidad de las revoluciones por minuto del equipo de prueba de jarras en vasos precipitados usados en los ensayos y relacionados con los accesorios como deflectores y rotores Ruey, Hudson, Singley y Camp (como se citó en Vargas 2004) establecieron con valores de viscosidad y temperatura del agua, área de la paleta y volumen del recipiente, el gráfico siguiente en la Figura 26.

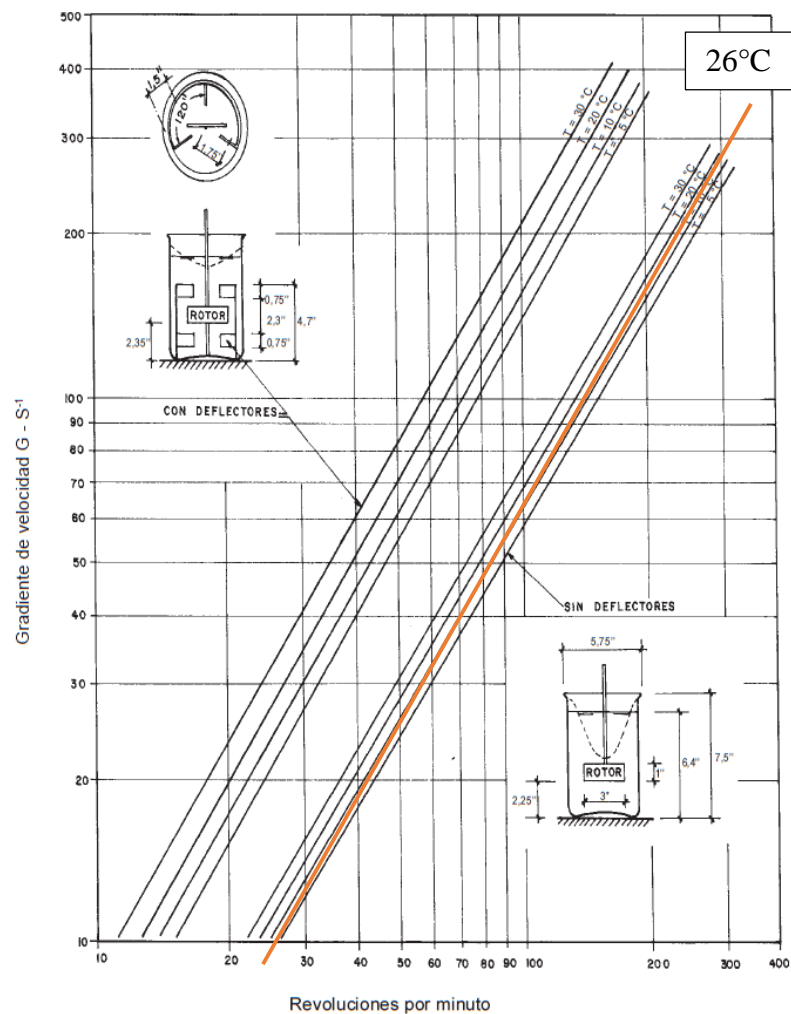


Figura 26. Gráfico que relaciona la gradiente de velocidad y las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con deflectores, tipo de rotor y vaso precipitado de 2 litros de tipo de componente circular (Vargas, 2004).

La evaluación de la eficiencia de remoción de turbiedad en el agua con tratamiento físico - químico coagulación – floculación; serán determinados por la turbidez inicial y residual, con la siguiente Ecuación 5 (Bravo & Gutiérrez, 2015).

$$\% \text{ de Eficiencia} = \frac{T_o - T_f}{T_o} \times 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

Donde:

To: Turbiedad inicial del agua a tratar

Tf: Turbiedad resultante del tratamiento

Para la clarificación del agua los coagulantes más empleados son los de origen inorgánico, los mismos que pueden llevar a ciertas desventajas tanto ambientales como económicas, debido a que los lodos generados en las etapas de floculación-coagulación y sedimentación formados por estos coagulantes que generalmente son vertidos a fuentes de agua, están compuestos por sustancias inorgánicas que alteran los procesos naturales del ciclo hídrico.

Económicamente los coagulantes inorgánicos son más costosos al tratarse de químicos que en su producción consumen mucha energía, generando también residuos que causan contaminación al ambiente. En cambio, los coagulantes naturales representan de un costo bajo, y que actúan en el agua sin afectar sus propiedades químicas iniciales incidiendo positivamente en la salud de las personas. Estos coagulantes naturales generalmente son empleados en plantas potabilizadoras para poblaciones pequeñas, convirtiéndose en una ventaja económico social y ambiental favorable (Arnal y Sancho, 2006).

Análisis Costo/Beneficio del coagulante – floculante natural del mucílago de *Opuntia ficus-indica* en el mejoramiento de la calidad de agua de consumo humano
En el Análisis de Presupuesto Parcial (APP) se identificó la información importante

para la toma de decisiones en los procesos de investigación y la adopción de la mejor alternativa del experimento en comparación a las diferentes alternativas; las decisiones están basadas también en un buen conocimiento de la tecnología para la implementación de alternativas ecológicas y ambientales.

El enfoque del presupuesto parcial, toma en consideración los costos que varían de un tratamiento a otro, costos que permiten al final diferenciar la mejor alternativa (Reyes, 2001). En esta investigación, el APP se utilizó para comparar el impacto del cambio tecnológico sobre los costos e ingresos de la planta potabilizadora de agua que cuenta la comunidad de Pusir Grande. Este presupuesto se denomina parcial porque no incluye todos los costos que implican el tratamiento del agua, sino sólo aquellos que son diferentes al comparar las prácticas usuales de tratamiento químico (Sulfato de Aluminio) que sigue el GAD Parroquial con la alternativa propuesta (mucílago de tuna).

El GAD Parroquial como administrador del agua debe decidir si continúa empleando el Sulfato de Aluminio para el tratamiento del agua en la planta potabilizadora o elegir un tratamiento natural comprobable, como lo es el mucílago de tuna. Así el uso de este coagulante natural hace disminuir al mismo tiempo el precio y posibles efectos secundarios en la salud de los beneficiarios.

5.6. Diseño de investigación

5.6.1. Regresión lineal

La regresión lineal permite trabajar con una variable a nivel de intervalo, para analizar la relación entre dos o más variables a través de ecuaciones. Las rectas

de regresión son las rectas que mejor se ajustan a la nube de puntos (o también llamado diagrama de dispersión) generada por una distribución binomial. Matemáticamente, son posibles dos rectas de máximo ajuste.

Para esta prueba se ha diseñado los niveles de las variables como se muestra en la Tabla 17, en los que se relaciona tres tipos de coagulantes (metálico de cloruro férrico (+1), mucílago en estado líquido (0) y en polvo (-1)) y el nivel de turbiedad inicial (Turbiedad Alta de 400 UNT (-1), media de 280 UNT (0) y baja a 60 UNT (+1)) obteniendo como variable respuesta la turbiedad residual. Los resultados de turbiedad residual están basados en las pruebas de concentración óptima de las cuales sólo toma el valor más bajo (UNT).

Tabla 17

Niveles de las variables

| Factores | | | |
|----------|--------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Niveles | X ₁ | X ₂ | |
| | Tipo de coagulante | Nivel de turbiedad inicial | Nivel de Concentración de coagulante |
| -1 | Cloruro férrico | Alto: 400 UNT (+1) | Jarra 1 |
| | | | Jarra 2 |
| | | Medio: 280 UNT (0) | Jarra 3 |
| | | | Jarra 4 |
| | | | Jarra 5 |
| | | | Jarra 6 |
| 0 | | Alto: 400 UNT (+1) | Jarra 1 |

| | | | |
|----|---|--------------------|---------|
| | | | Jarra 2 |
| | | | Jarra 3 |
| -1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | Medio: 280 UNT (0) | Jarra 4 |
| | | | Jarra 5 |
| | | Bajo: 60 UNT (-1) | Jarra 6 |
| | | | Jarra 1 |
| | | Alto: 400 UNT (+1) | Jarra 2 |
| | | | Jarra 3 |
| -1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> líquido | Medio: 280 UNT (0) | Jarra 4 |
| | | | Jarra 5 |
| | | Bajo: 60 UNT (-1) | Jarra 6 |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

5.6.2. Prueba Kruskal-Wallis

Se analizará estadísticamente con la prueba no paramétrica ANOVA by Ranks de Kruskal-Wallis para controlar el error en el diseño de las pruebas de laboratorio por medio del Software *Statística* 13. Esta prueba supone que la variable en cuestión es continua y que se midió en al menos una escala ordinal (orden de clasificación); además, evalúa la hipótesis de que las diferentes muestras en la comparación se tomaron de la misma distribución o de distribuciones con la misma mediana. Por lo tanto, la interpretación de la prueba de Kruskal-Wallis es básicamente idéntica a la del ANOVA paramétrico de una vía, excepto que se basa en rangos en lugar de medias.

La prueba de la Mediana es una versión "cruda" del ANOVA de Kruskal-Wallis en que enmarca el cálculo en términos de una tabla de contingencia. Específicamente, STATISTICA simplemente contará el número de casos en cada muestra que caen por encima o por debajo de la mediana común, y calcularán el valor Chi-cuadrado para el resultado de 2 x K muestras de tabla de contingencia. Bajo la hipótesis nula (todas las muestras provienen de poblaciones con medianas idénticas), esperamos que aproximadamente el 50% de todos los casos en cada muestra caigan por encima (o por debajo) de la mediana común. En este caso, la prueba de la mediana es, de hecho, el único método apropiado para comparar muestras.

Para tal prueba se ha diseñado los niveles de las variables como se muestra en la Tabla 18 y 19, en los que se relaciona tres tipos de coagulantes (metálico de cloruro férrico (+1), mucílago en estado líquido (0) y en polvo (-1)) y el nivel de turbiedad inicial (Turbiedad Alta de 400 UNT (-1), media de 280 UNT (0) y baja a 60 UNT (+1)) obteniendo como variable respuesta la turbiedad residual. Los resultados de turbiedad residual están basados en las pruebas de concentración óptima de las cuales sólo toma el valor más bajo (UNT).

Tabla 18

Niveles de las variables

| Niveles | Factores | |
|---------|--------------------------------------|----------------------------|
| | X ₁ | X ₂ |
| | Tipo de coagulante | Nivel de turbiedad inicial |
| -1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | Alto: 400 UNT |
| 0 | <i>Opuntia ficus-indica</i> líquido | Medio: 280 UNT |
| 1 | Cloruro férrico | Bajo: 60 UNT |

Tabla 19

Configuración de niveles y factores codificados

| Ensayo Réplica | Codificado | | No Codificado | |
|-------------------|----------------|----------------|--------------------------------------|--------------------|
| | X ₁ | X ₂ | Tipo de coagulante | Nivel de turbiedad |
| 1 | -1 | -1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | Alto: 400 UNT |
| 1 | -1 | 0 | <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | Medio: 280 UNT |
| 1 | -1 | 1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | Bajo: 60 UNT |
| 1 | 0 | -1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> líquido | Alto: 400 UNT |
| 1 | 0 | 0 | <i>Opuntia ficus-indica</i> líquido | Medio: 280 UNT |
| 1 | 0 | 1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> líquido | Bajo: 60 UNT |
| 1 | 1 | -1 | Cloruro férrico | Alto: 400 UNT |

| | | | | |
|---|----|----|--------------------------------------|----------------|
| 1 | 1 | 0 | Cloruro férrico | Medio: 280 UNT |
| 1 | 1 | 1 | Cloruro férrico | Bajo: 60 UNT |
| 2 | -1 | -1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | Alto: 400 UNT |
| 2 | -1 | 0 | <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | Medio: 280 UNT |
| 2 | -1 | 1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | Bajo: 60 UNT |
| 2 | 0 | -1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> líquido | Alto: 400 UNT |
| 2 | 0 | 0 | <i>Opuntia ficus-indica</i> líquido | Medio: 280 UNT |
| 2 | 0 | 1 | <i>Opuntia ficus-indica</i> líquido | Bajo: 60 UNT |
| 2 | 1 | -1 | Cloruro férrico | Alto: 400 UNT |
| 2 | 1 | 0 | Cloruro férrico | Medio: 280 UNT |
| 2 | 1 | 1 | Cloruro férrico | Bajo: 60 UNT |

Nota. UNT: Unidad Nefelométrica de turbidez

X₁: Tipo de coagulante

X₂: Nivel de turbiedad (UNT)

5.6.3. Hipótesis

Factor: Tipo de coagulante

H₀: El tipo de coagulante **no** influye en la remoción de turbidez del agua para uso de riego.

H_a: El tipo de coagulante influye en la remoción de turbidez del agua para uso de riego.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados de ensayos de laboratorio de dosis y concentración óptima

Los resultados que se muestran son de ensayos de tratabilidad en laboratorio por Prueba de Jarras en el que se determinaron parámetros de dosis y concentración óptima de coagulantes a prueba con el agua del canal de riego de las áreas verdes del campus universitario. Los ensayos se realizaron con dos factores determinantes, el primer factor es el tipo de coagulante diferenciados por su naturaleza química (cloruro férrico) y polímero natural (mucílago de *Opuntia ficus-indica*), y ésta última en dos casos de acuerdo al método de extracción el primero por maceración y el segundo en polvo; y el segundo factor es la cantidad de turbiedad inicial (Alta con 400 UNT, media de 280 UNT y baja de 60 UNT). Los factores actúan sobre la variable respuesta de Turbiedad residual y porcentaje de remoción.

4.2. Resultados con coagulante de Mucílago de *Opuntia ficus-indica* en polvo

En las tablas 20, 21 y 22 se muestran los resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de *Opuntia ficus-indica* en polvo a turbiedad alta (400 UNT), media (280 UNT) y baja (60 UNT) respectivamente. En todos los casos se realizaron tres réplicas.

Tabla 20

Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en polvo a turbiedad alta (400 UNT)

| RESULTADOS DE ENSAYOS DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN | | | | | | |
|--|-----------------|--|---|-----------|--------------|-----------|
| TIPO DE COAGULANTE: | | Mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | | | | |
| TURBIEDAD: | | 400 UNT | | | | |
| PARÁMETROS INICIALES: | | | | | | |
| pH: 7.5 unid pH | | Temperatura: | | 26°C | | |
| CONDICIONES DE MEZCLA: | | | | | | |
| | Velocidad (RPM) | | Gradiente de velocidad (S ⁻¹) | | Tiempo (min) | |
| Mezcla rápida | 100 RPM | | 190 S ⁻¹ | | 1 min | |
| Mezcla lenta | 40 RPM | | 70 S ⁻¹ | | 20 min | |
| Sedimentación | 0 RPM | | 0 S ⁻¹ | | 10 min | |
| ENSAYO DE LABORATORIO: | | | Dosis óptima | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 35 | 38 | 40 | 42 | 45 | 47 |
| Concentración (%): | 5 | | | | | |
| Cantidad (ml/2L): | 1.4 | 1.52 | 1.6 | 1.68 | 1.8 | 1.9 |
| Turbiedad residual (UNT): | 18.0 | 17.0 | 9.5 | 14.0 | 14.8 | 17.0 |
| % de Remoción: | 95.5 | 95.8 | 97.6 | 96.5 | 96.3 | 95.8 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.8 seg | 1.9 seg | 1.25-2.25 /1.2 seg | 2 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |

| | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|-----------|
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 15.0 | 8.0 | 7.3 | 8.3 | 9.3 | 15.0 |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 96.3 | 98.0 | 98.2 | 97.9 | 97.7 | 96.3 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 16.3 | 9.0 | 7.6 | 8.9 | 9.9 | 20.0 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 95.9 | 97.8 | 98.1 | 97.8 | 97.5 | 95.0 |
| Tamaño/tiempo de formación de floc | 1.5 seg | 2 seg | 2.5 seg | 1.5 seg | 1.25-2.25 /1.5 seg | 1.5 |
| ENSAYO DE LABORATORIO: Concentración óptima | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 42 | | | | | |
| Concentración (%): | 1 | 3 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| Cantidad (ml/2L): | 8.4 | 2.8 | 1.86 | 1.68 | 1.52 | 1.4 |
| Turbiedad residual (UNT): | 17.0 | 17.3 | 15.0 | 8.3 | 11.0 | 13.0 |
| % de Remoción: | 95.8 | 95.7 | 96.3 | 97.9 | 97.3 | 96.8 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.8 seg | 1.9 seg | 2 seg | 1.25-2.25 /1.2 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 13.0 | 14.0 | 10.0 | 7.1 | 9.0 | 14.2 |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 96.8 | 96.5 | 97.5 | 98.2 | 97.8 | 96.5 |

| | | | | | | |
|------------------------------------|---------|---------|-------|---------|--------------------|------|
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 16.0 | 15.6 | 7.5 | 8.0 | 10.0 | 17.0 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 96.0 | 96.1 | 98.1 | 98.0 | 97.5 | 95.8 |
| Tamaño/tiempo de formación de floc | 1.8 seg | 1.9 seg | 2 seg | 1.7 seg | 1.25-2.25 /1.5 seg | 1.9 |

Tabla 21

Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en polvo a turbiedad media (280 UNT)

| RESULTADOS DE ENSAYOS DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN | | | |
|--|-----------------|--|--------------|
| TIPO DE COAGULANTE: | | Mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | |
| TURBIEDAD: | | 280 UNT | |
| PARÁMETROS INICIALES: | | | |
| pH: 7.5 unid pH | | Temperatura: | 26°C |
| CONDICIONES DE MEZCLA: | | | |
| | Velocidad (RPM) | Gradiente de velocidad (S ⁻¹) | Tiempo (min) |
| Mezcla rápida | 100 RPM | 190 S ⁻¹ | 1 min |
| Mezcla lenta | 40 RPM | 70 S ⁻¹ | 20 min |
| Sedimentación | 0 RPM | 0 S ⁻¹ | 10 min |
| ENSAYO DE LABORATORIO: | | Dosis óptima | |

| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
|--|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|
| Dosis (mg/L) | 20 | 24 | 27 | 30 | 33 | 35 |
| Concentración (%): | 5 | | | | | |
| Cantidad (ml/2L): | 0.8 | 0.96 | 1.08 | 1.2 | 1.32 | 1.4 |
| Turbiedad residual (UNT): | 14.0 | 12.0 | 9.6 | 9.0 | 12.0 | 16.0 |
| % de Remoción: | 95.0 | 95.7 | 96.6 | 96.8 | 95.7 | 94.3 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 2.8 seg | 2.9 seg | 2.5 seg | 1.25-2.25 /1.8 seg | 1.9 seg | 1.9 seg |
| Primera RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 11.0 | 8.7 | 8.0 | 7.5 | 9.3 | 14.0 |
| Primera RÉPLICA % de Remoción: | 96.1 | 96.9 | 97.1 | 97.3 | 96.7 | 95.0 |
| Segunda RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 15.0 | 12.0 | 9.0 | 8.3 | 9.9 | 16.0 |
| Segunda RÉPLICA % de Remoción: | 94.6 | 95.7 | 96.8 | 97.0 | 96.5 | 94.3 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 2.6 seg | 1.9 seg | 2.1 seg | 1.25-2.25 /1.2 seg | 1.7 seg | 1.9 seg |
| ENSAYO DE LABORATORIO: Concentración óptima | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 30 | | | | | |
| Concentración (%): | 1 | 3 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| Cantidad (ml/2L): | 6 | 2 | 1.2 | 1.2 | 1.09 | 1 |

| | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| Turbiedad residual (UNT): | 17.0 | 16.3 | 16.3 | 9.0 | 14.0 | 14.9 |
| % de Remoción: | 93.9 | 94.2 | 94.2 | 96.8 | 95.0 | 94.7 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 2.3 seg | 2 seg | 2.3 seg | 1.25-2.25 /2 seg | 1.7 seg | 2 seg |
| Primera RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 18.0 | 18.0 | 13.0 | 10.0 | 12.9 | 17.0 |
| Primera RÉPLICA % de Remoción: | 93.6 | 93.6 | 95.4 | 96.4 | 95.4 | 93.9 |
| Segunda RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 14.0 | 13.0 | 9.0 | 10.0 | 14.0 | 17.0 |
| Segunda RÉPLICA % de Remoción: | 95.0 | 95.4 | 96.8 | 96.4 | 95.0 | 93.9 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 2.5 seg | 1.9 seg | 2 seg | 1.25-2.25 /2.3 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |

-

Tabla 22

Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en polvo a turbiedad baja (60 UNT)

| RESULTADOS DE ENSAYOS DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN | | | | | | |
|--|-----------------|--|---|--------------------|--------------|-----------|
| TIPO DE COAGULANTE: | | Mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> en polvo | | | | |
| TURBIEDAD: | | 60 UNT | | | | |
| PARÁMETROS INICIALES: | | | | | | |
| pH: 7.5 unid pH | | Temperatura: | | 26°C | | |
| CONDICIONES DE MEZCLA: | | | | | | |
| | Velocidad (RPM) | | Gradiente de velocidad (S ⁻¹) | | Tiempo (min) | |
| Mezcla rápida | 100 RPM | | 190 S ⁻¹ | | 1 min | |
| Mezcla lenta | 40 RPM | | 70 S ⁻¹ | | 20 min | |
| Sedimentación | 0 RPM | | 0 S ⁻¹ | | 10 min | |
| ENSAYO DE LABORATORIO: | | | Dosis óptima | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 14 | 16 | 18 | 20 | 24 | 26 |
| Concentración (%): | 5 | | | | | |
| Cantidad (ml/2L): | 0.56 | 0.64 | 0.72 | 0.8 | 0.96 | 1.04 |
| Turbiedad residual (UNT): | 12.0 | 11.6 | 7.3 | 5.3 | 8.4 | 9.8 |
| % de Remoción: | 80.0 | 80.7 | 87.8 | 91.2 | 86.0 | 83.7 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.8 seg | 1.9 seg | 2 seg | 1.25-2.25 /1.2 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |

| | | | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|
| Primera RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 9.9 | 7.5 | 7.3 | 5.7 | 7.4 | 7.5 |
| Primera RÉPLICA % de Remoción: | 83.5 | 87.5 | 87.8 | 90.5 | 87.7 | 87.5 |
| Segunda RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 11.0 | 8.9 | 7.3 | 6.0 | 9.0 | 17.0 |
| Segunda RÉPLICA % de Remoción: | 81.7 | 85.2 | 87.8 | 90.0 | 85.0 | 71.7 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 2 seg | 1.9 seg | 2 seg | 1.25-2.25 /1.2 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |
| ENSAYO DE LABORATORIO: Concentración óptima | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 20 | | | | | |
| Concentración (%): | 1 | 3 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| Cantidad (ml/2L): | 4 | 1.3 | 0.8 | 0.85 | 0.7 | 0.6 |
| Turbiedad residual (UNT): | 13.0 | 13.5 | 11.0 | 10.0 | 15.0 | 15.3 |
| % de Remoción: | 78.3 | 77.5 | 81.7 | 83.3 | 75.0 | 74.5 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.8 seg | 1.9 seg | 2.3 seg | 1.25-2.25 /1.3 seg | 1.5 seg | 1.7 seg |
| Primera RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 10.0 | 9.3 | 9.0 | 7.4 | 10.0 | 17.0 |
| Primera RÉPLICA % de Remoción: | 83.3 | 84.5 | 85.0 | 87.7 | 83.3 | 71.7 |

| | | | | | | |
|--|-------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 11.0 | 9.0 | 7.3 | 6.0 | 8.0 | 12.0 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 81.7 | 85.0 | 87.8 | 90.0 | 86.7 | 80.0 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 2 seg | 1.9 seg | 1.8 seg | 1.25-2.25 /1.8 seg | 1.9 seg | 1.9 seg |

En las Figuras 27, 28, 29 y 30 se aprecian los resultados de turbiedad residual por jarra a diferentes niveles de turbiedad (Alta, media y baja), esta gráfica permite corroborar la estabilidad las dosificaciones establecidos con la turbiedad residual de acuerdo a la dinámica de demanda de dosificación por carga de turbiedad inicial.

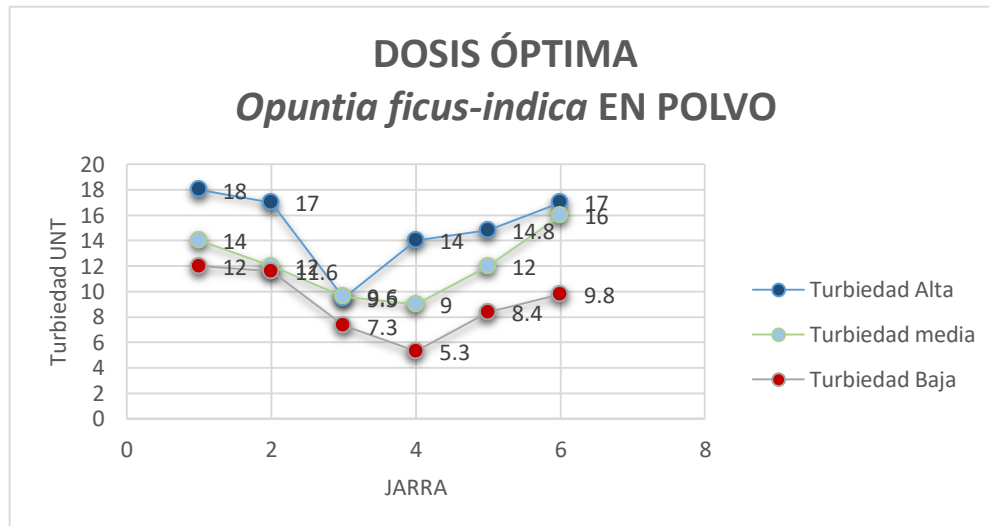


Figura 27. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con *Opuntia ficus-indica* en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja de 60 UNT)

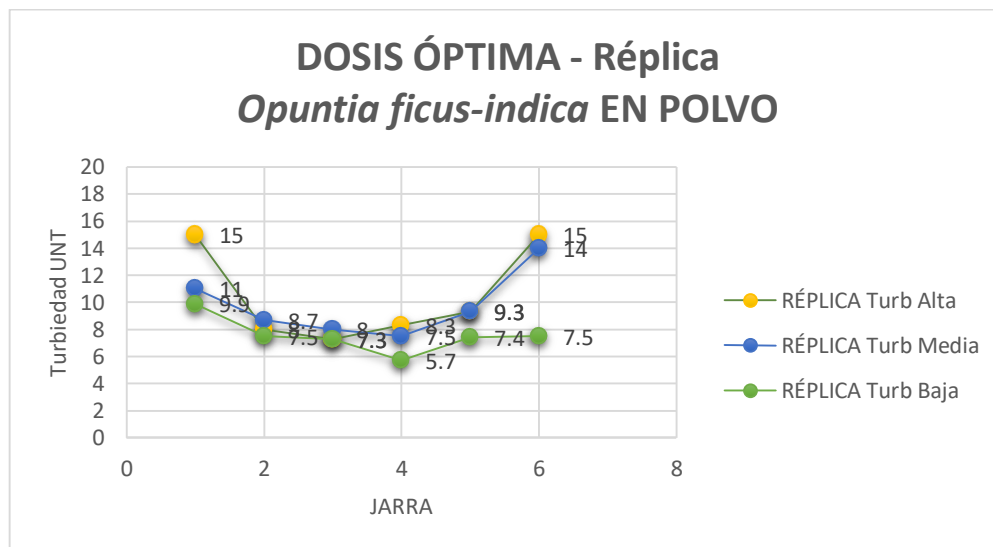


Figura 28. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima *con Opuntia ficus-indica* en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

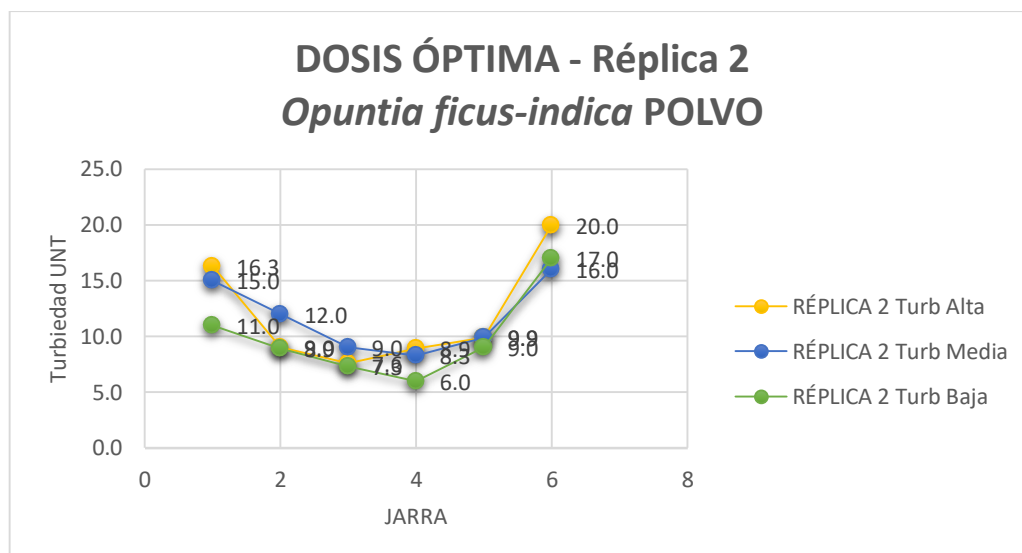


Figura 29. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima *con Opuntia ficus-indica* en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media 280UNT y baja, 60 UNT)

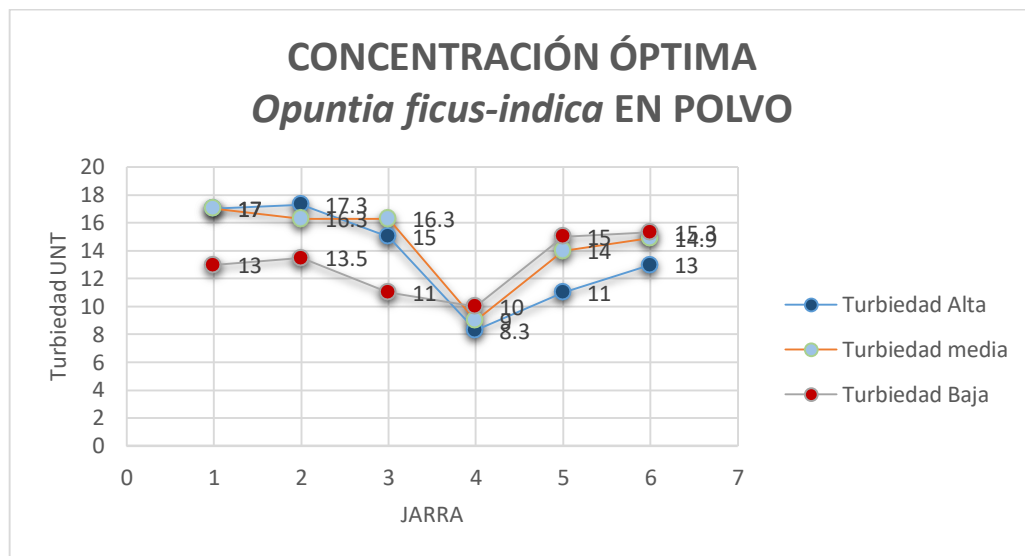


Figura 30. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con *Opuntia ficus-indica* en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

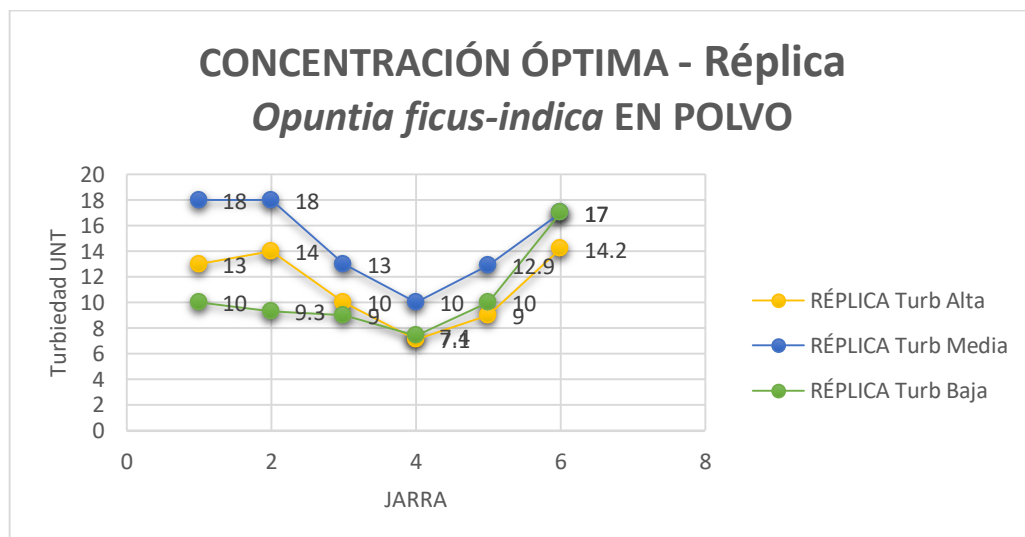


Figura 31. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con *Opuntia ficus-indica* en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

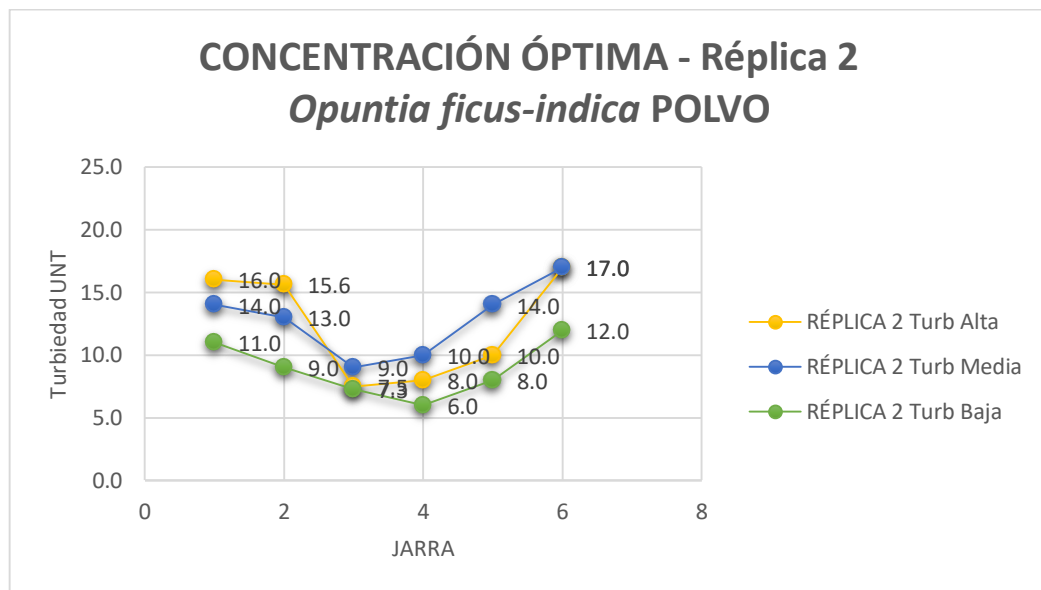


Figura 32. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con *Opuntia ficus-indica* en polvo con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

4.3. Resultados con coagulante de Mucílago de *Opuntia ficus-indica* macerado

En las tablas 23, 24 y 25 se muestran los resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de *Opuntia ficus-indica* macerado a turbiedad alta (400 UNT), media (280 UNT) y baja (60 UNT) respectivamente

Tabla 23

Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en líquido a turbiedad alta (400 UNT)

| RESULTADOS DE ENSAYOS DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN | | | | | | |
|--|-----------------|--|---|--------------------|--------------|-----------|
| TIPO DE COAGULANTE: | | Mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> macerado | | | | |
| TURBIEDAD: | | 400 UNT | | | | |
| PARÁMETROS INICIALES: | | | | | | |
| pH: 7.5 unid pH | | Temperatura: | | 26°C | | |
| CONDICIONES DE MEZCLA: | | | | | | |
| | Velocidad (RPM) | | Gradiente de velocidad (S ⁻¹) | | Tiempo (min) | |
| Mezcla rápida | 100 RPM | | 190 S ⁻¹ | | 1 min | |
| Mezcla lenta | 40 RPM | | 70 S ⁻¹ | | 20 min | |
| Sedimentación | 0 RPM | | 0 S ⁻¹ | | 10 min | |
| ENSAYO DE LABORATORIO: | | | Dosis óptima | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 35 | 38 | 40 | 42 | 45 | 47 |
| Concentración (%): | 5 | | | | | |
| Cantidad (ml/2L): | 1.4 | 1.52 | 1.6 | 1.68 | 1.8 | 1.9 |
| Turbiedad residual (UNT): | 58.0 | 51.3 | 49.0 | 53.0 | 55.5 | 57.5 |
| % de Remoción: | 85.5 | 87.2 | 87.8 | 86.8 | 86.1 | 85.6 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2.3 seg | 2.5 seg | 1.25-2.25 /1.8 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |

| | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------------------------|--------------------|-----------|-----------|
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 59.6 | 57.0 | 48.6 | 52.0 | 53.3 | 58.0 |
| Primera RÉPLICA | 85.1 | 85.8 | 87.9 | 87.0 | 86.7 | 85.5 |
| % de Remoción: | | | | | | |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 54.3 | 53.0 | 49.0 | 50.0 | 51.3 | 54.0 |
| Segunda RÉPLICA | 86.4 | 86.8 | 87.8 | 87.5 | 87.2 | 86.5 |
| % de Remoción: | | | | | | |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.8 seg | 1.9 seg | 2 seg | 1.25-2.25 /1.8 seg | 1.8 seg | 2.5 seg |
| ENSAYO DE LABORATORIO: | | | Concentración óptima | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 40 | | | | | |
| Concentración (%): | 1 | 3 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| Cantidad (ml/2L): | 8 | 2.6 | 1.7 | 1.6 | 1.45 | 1.3 |
| Turbiedad residual (UNT): | 58.0 | 56.0 | 15.0 | 53.0 | 54.4 | 57.0 |
| % de Remoción: | 85.5 | 86.0 | 96.3 | 86.8 | 86.4 | 85.8 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.5 seg | 1.5 seg | 2 seg | 1.25-2.25 /1.2 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 58.0 | 57.4 | 48.0 | 52.6 | 55.0 | 58.0 |
| Primera RÉPLICA | 85.5 | 85.7 | 88.0 | 86.9 | 86.3 | 85.5 |
| % de Remoción: | | | | | | |

| | | | | | | |
|--|---------|-------|-------|--------------------|---------|-------|
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 57.9 | 56.8 | 41.0 | 57.7 | 54.9 | 57.0 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 85.5 | 85.8 | 89.8 | 85.6 | 86.3 | 85.8 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.7 seg | 2 seg | 2 seg | 1.25-2.25 /1.2 seg | 1.4 seg | 2 seg |

Tabla 24

Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en líquido a turbiedad media (280 UNT)

| RESULTADOS DE ENSAYOS DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN | | | |
|--|-----------------|---|--------------|
| TIPO DE COAGULANTE: | | Mucílago de Opuntia ficus-indica en líquido | |
| TURBIEDAD: | | 280 UNT | |
| PARÁMETROS INICIALES: | | | |
| pH: 7.5 unid pH | | Temperatura: | 26°C |
| CONDICIONES DE MEZCLA: | | | |
| | Velocidad (RPM) | Gradiente de velocidad (S ⁻¹) | Tiempo (min) |
| Mezcla rápida | 100 RPM | 190 S ⁻¹ | 1 min |
| Mezcla lenta | 40 RPM | 70 S ⁻¹ | 20 min |
| Sedimentación | 0 RPM | 0 S ⁻¹ | 10 min |
| ENSAYO DE LABORATORIO: | | Dosis óptima | |

| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
|--|--------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|
| Dosis (mg/L) | 20 | 24 | 27 | 30 | 33 | 35 |
| Concentración (%): | 5 | | | | | |
| Cantidad (ml/2L): | 0.8 | 0.96 | 1.08 | 1.2 | 1.32 | 1.4 |
| Turbiedad residual (UNT): | 45.6 | 43.0 | 41.0 | 39.5 | 42.0 | 45.0 |
| % de Remoción: | 83.7 | 84.6 | 85.4 | 85.9 | 85.0 | 83.9 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.8 seg | 1.9 seg | 2 seg | 1-1.5mm /1.2 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 47.0 | 44.6 | 42.0 | 41.0 | 46.0 | 47.9 |
| Primera RÉPLICA % de Remoción: | 83.2 | 84.1 | 85.0 | 85.4 | 83.6 | 82.9 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 45.0 | 41.0 | 40.5 | 43.0 | 48.0 | 50.0 |
| Segunda RÉPLICA % de Remoción: | 83.9 | 85.4 | 85.5 | 84.6 | 82.9 | 82.1 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 2 seg | 1.8 seg | 2.2 seg | 1-1.5mm /1.2 seg | 1.5 seg | 1.7 seg |
| ENSAYO DE LABORATORIO: Concentración óptima | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 30 | | | | | |
| Concentración (%): | 1 | 3 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| Cantidad (ml/2L): | 6 | 2 | 1.3 | 1.2 | 1.09 | 1 |

| | | | | | | |
|--|---------|---------|--------------------|------------------|---------|---------|
| Turbiedad residual (UNT): | 48.0 | 45.3 | 16.0 | 43.6 | 45.0 | 47.0 |
| % de Remoción: | 82.9 | 83.8 | 94.3 | 84.4 | 83.9 | 83.2 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2.3 seg | 2.5 seg | 1-1.5mm /1.8 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 37.0 | 33.0 | 29.0 | 31.6 | 36.6 | 38.0 |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 86.8 | 88.2 | 89.6 | 88.7 | 86.9 | 86.4 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 38.9 | 31.0 | 28.0 | 32.0 | 38.0 | 43.0 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 86.1 | 88.9 | 90.0 | 88.6 | 86.4 | 84.6 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.5 seg | 2.1 seg | 1.25-2.25 /1.8 seg | 2.5 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |

-

Tabla 25

Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante Mucílago de Opuntia ficus-indica en líquido a turbiedad baja (60 UNT)

| RESULTADOS DE ENSAYOS DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN | | | | | | |
|--|-----------------|---|---|------------------|--------------|-----------|
| TIPO DE COAGULANTE: | | Mucílago de Opuntia ficus-indica en líquido | | | | |
| TURBIEDAD: | | 60 UNT | | | | |
| PARÁMETROS INICIALES: | | | | | | |
| pH: 7.5 unid pH | | Temperatura: | | 26°C | | |
| CONDICIONES DE MEZCLA: | | | | | | |
| | Velocidad (RPM) | | Gradiente de velocidad (S ⁻¹) | | Tiempo (min) | |
| Mezcla rápida | 100 RPM | | 190 S ⁻¹ | | 1 min | |
| Mezcla lenta | 40 RPM | | 70 S ⁻¹ | | 20 min | |
| Sedimentación | 0 RPM | | 0 S ⁻¹ | | 10 min | |
| ENSAYO DE LABORATORIO: | | | | Dosis óptima | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 14 | 16 | 18 | 20 | 24 | 26 |
| Concentración (%): | 5 | | | | | |
| Cantidad (ml/2L): | 0.56 | 0.64 | 0.72 | 0.8 | 0.96 | 1.04 |
| Turbiedad residual (UNT): | 23.0 | 22.0 | 21.0 | 17.0 | 22.0 | 23.4 |
| % de Remoción: | 61.7 | 63.3 | 65.0 | 71.7 | 63.3 | 61.0 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.7 seg | 2 seg | 1.5 seg | 1-1.5mm /1.8 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |

| | | | | | | |
|--|--------------|--------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|
| Primera RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 25.0 | 22.0 | 21.3 | 18.0 | 21.0 | 23.3 |
| Primera RÉPLICA % de Remoción: | 58.3 | 63.3 | 64.5 | 70.0 | 65.0 | 61.2 |
| Segunda RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 23.0 | 20.9 | 20.8 | 17.8 | 19.7 | 22.0 |
| Segunda RÉPLICA % de Remoción: | 61.7 | 65.2 | 65.3 | 70.3 | 67.2 | 63.3 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2.3 seg | 2.5 seg | 1-1.5mm /1.8 seg | 1.5 seg | 1.9 seg |
| ENSAYO DE LABORATORIO: Concentración óptima | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 20 | | | | | |
| Concentración (%): | 1 | 3 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| Cantidad (ml/2L): | 4 | 1.3 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.6 |
| Turbiedad residual (UNT): | 20.0 | 16.0 | 12.0 | 15.0 | 17.0 | 20.9 |
| % de Remoción: | 66.7 | 73.3 | 80.0 | 75.0 | 71.7 | 65.2 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 2 seg | 2.3 seg | 1-1.5mm /1.8 seg | 2 seg | 1.5 seg | 2 seg |
| Primera RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 27.0 | 23.0 | 12.0 | 25.0 | 26.5 | 27.0 |
| Primera RÉPLICA % de Remoción: | 55.0 | 61.7 | 80.0 | 58.3 | 55.8 | 55.0 |

| | | | | | | |
|--|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 29.8 | 27.0 | 20.9 | 25.5 | 28.0 | 28.7 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 50.3 | 55.0 | 65.2 | 57.5 | 53.3 | 52.2 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2.3 seg | 1-1.5mm /1.8 seg | 2.5 seg | 1.7 seg | 1.5 seg |

En las Figuras 33, 34, 35 y 36 se aprecian los resultados de turbiedad residual por jarra a diferentes niveles de turbiedad (Alta, media y baja), esta gráfica permite corroborar la estabilidad las dosificaciones establecidos con la turbiedad residual de acuerdo a la dinámica de demanda de dosificación por carga de turbiedad inicial.

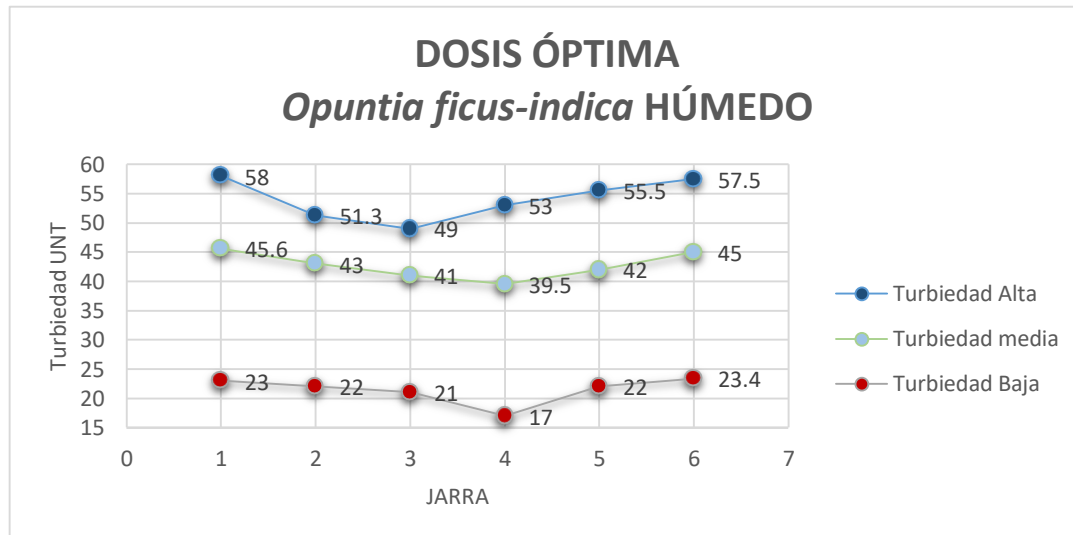


Figura 33. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima *con Opuntia ficus-indica* líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

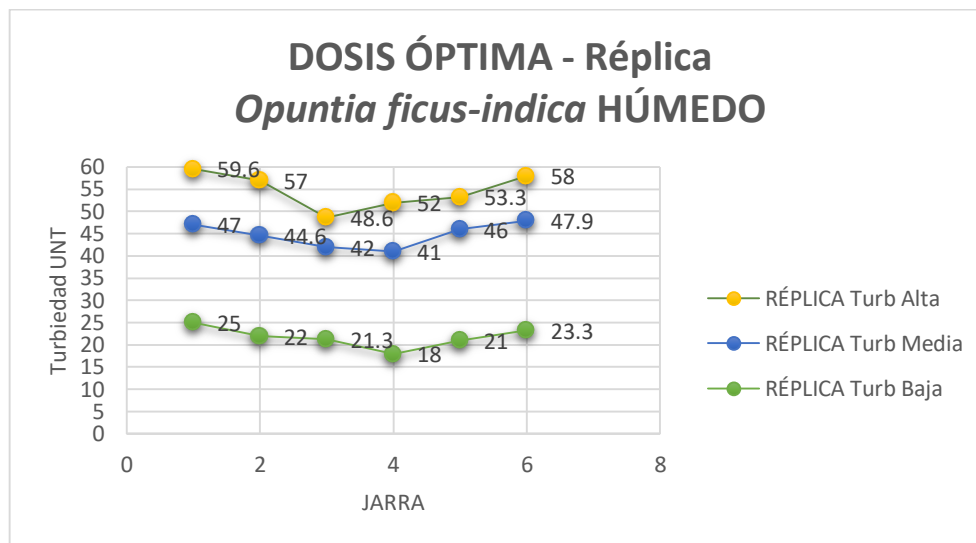


Figura 34. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con *Opuntia ficus-indica* líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

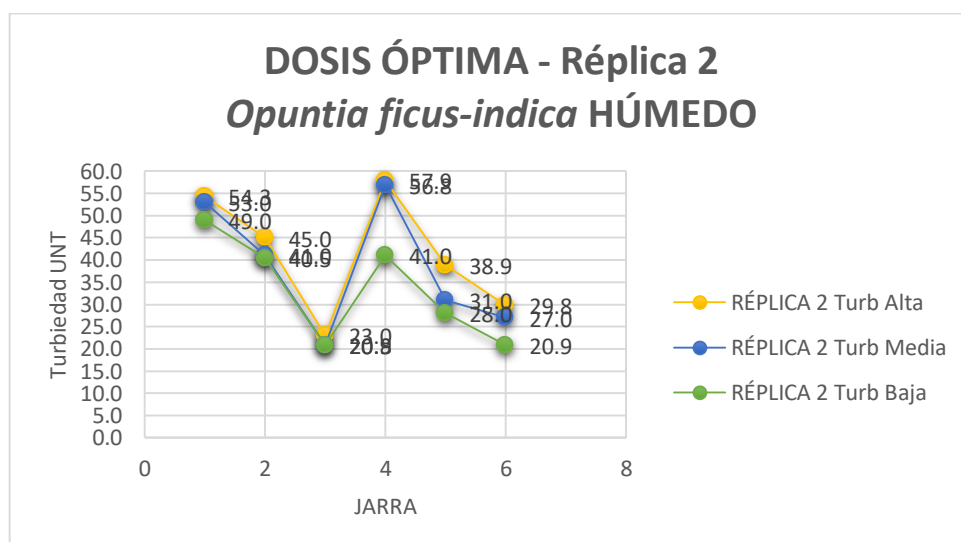


Figura 35. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con *Opuntia ficus-indica* líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

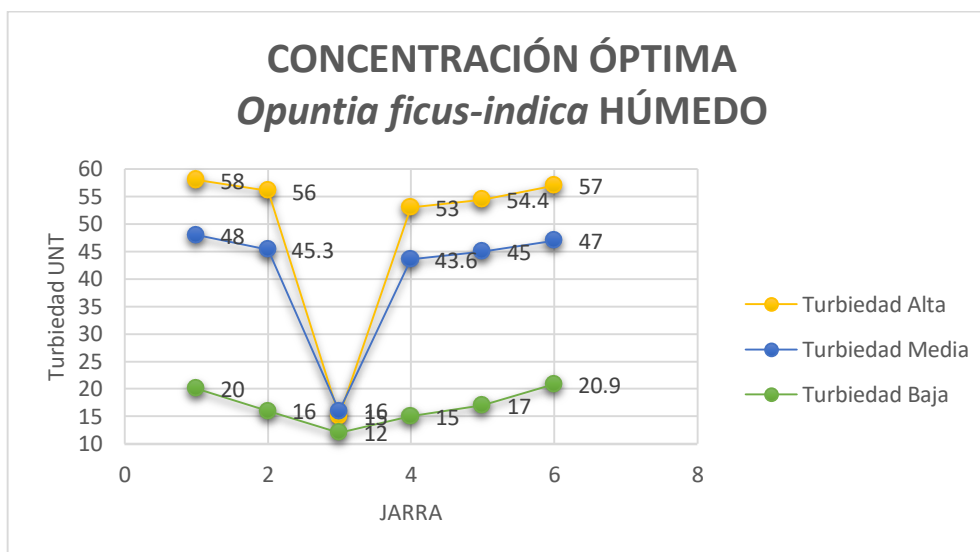


Figura 36. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con *Opuntia ficus-indica* líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

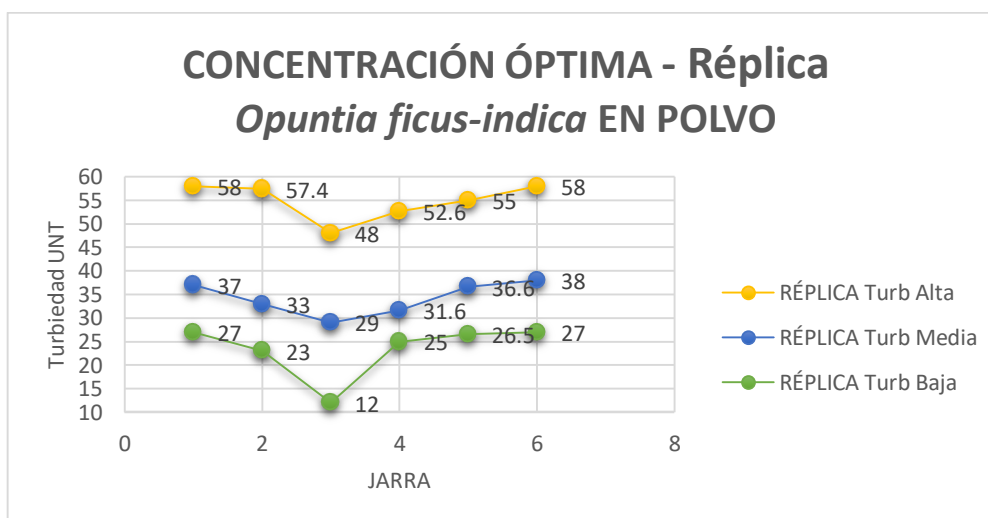


Figura 37. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con *Opuntia ficus-indica* líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

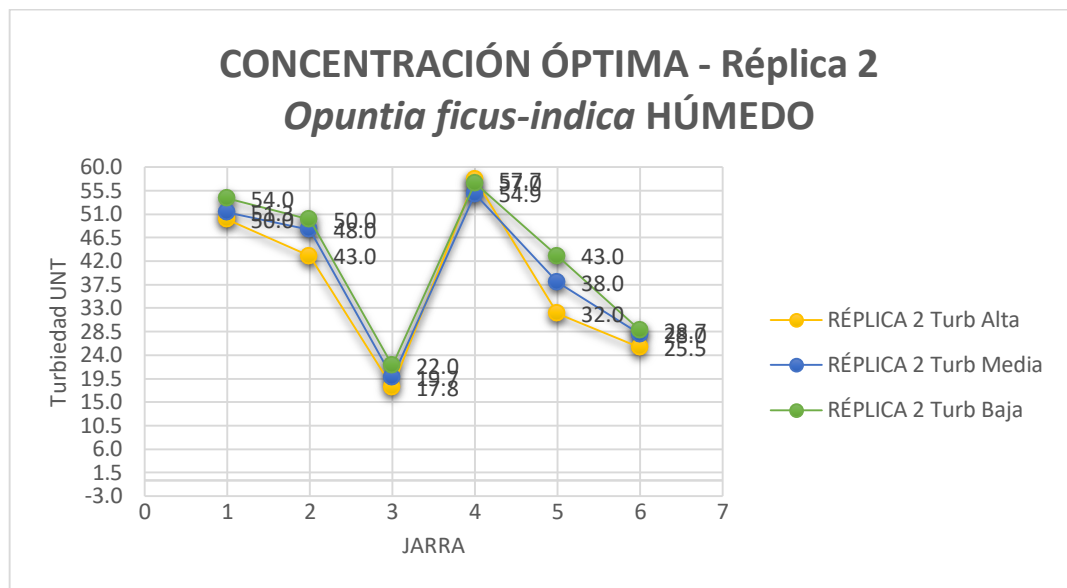


Figura 38. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con *Opuntia ficus-indica* líquido con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

4.4. Resultados con coagulante cloruro férrico

En las tablas 26, 27 y 28 se muestran los resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante cloruro férrico a turbiedad alta (400 UNT), media (280 UNT) y baja (60 UNT) respectivamente.

Tabla 26

Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante cloruro férrico a turbiedad alta (400 UNT)

| RESULTADOS DE ENSAYOS DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN | | | | | | |
|--|-----------------|------------------|---|-----------|--------------|-----------|
| TIPO DE COAGULANTE: | | Cloruro férrico | | | | |
| TURBIEDAD: | | 400 UNT | | | | |
| PARÁMETROS INICIALES: | | | | | | |
| pH: 7.5 unid pH | | Temperatura: | | 26°C | | |
| CONDICIONES DE MEZCLA: | | | | | | |
| | Velocidad (RPM) | | Gradiente de velocidad (S ⁻¹) | | Tiempo (min) | |
| Mezcla rápida | 300 RPM | | 600 S ⁻¹ | | 1 min | |
| Mezcla lenta | 40 RPM | | 70 S ⁻¹ | | 20 min | |
| Sedimentación | 0 RPM | | 0 S ⁻¹ | | 10 min | |
| ENSAYO DE LABORATORIO: | | | Dosis óptima | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 55 |
| Concentración (%): | 2 | | | | | |
| Cantidad (ml/2L): | 3.6 | 4 | 4.4 | 4.8 | 5.2 | 5.5 |
| Turbiedad residual (UNT): | 3.6 | 2.4 | 3.0 | 3.6 | 3.8 | 4.0 |
| % de Remoción: | 99.1 | 99.4 | 99.3 | 99.1 | 99.1 | 99.0 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 1.5-2mm /1.8 seg | 2.5 seg | 2.3 seg | 2 seg | 2 seg |

| | | | | | | |
|--|------------------|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 3.5 | 2.0 | 3.7 | 3.3 | 3.9 | 4.0 |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 99.1 | 99.5 | 99.1 | 99.2 | 99.0 | 99.0 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 3.6 | 2.0 | 3.7 | 3.6 | 4.0 | 4.6 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 99.1 | 99.5 | 99.1 | 99.1 | 99.0 | 98.9 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.5-2mm /1.5 seg | 2.3 seg | 1.5 seg | 1.9 seg | 1.5 seg | 1.5 seg |
| ENSAYO DE LABORATORIO: Concentración óptima | | | | | | |
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 40 | | | | | |
| Concentración (%): | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| Cantidad (ml/2L): | 16 | 8 | 4 | 26 | 1.60 | 0.8 |
| Turbiedad residual (UNT): | 3.5 | 3.0 | 2.1 | 3.4 | 3.0 | 3.9 |
| % de Remoción: | 99.1 | 99.3 | 99.5 | 99.2 | 99.3 | 99.0 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2 seg | 1.5-2mm /1.8 seg | 2 seg | 2.5 seg | 1seg |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 3.1 | 3.5 | 2.0 | 3.0 | 3.3 | 3.9 |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 99.2 | 99.1 | 99.5 | 99.2 | 99.2 | 99.0 |

| | | | | | | |
|--|-------|---------|---------|------------------|---------|-------|
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 3.9 | 3.9 | 2.7 | 2.8 | 3.0 | 3.5 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 99.0 | 99.0 | 99.3 | 99.3 | 99.3 | 99.1 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1 seg | 2.5 seg | 2.5 seg | 1.5-2mm /1.5 seg | 1.5 seg | 2 seg |

Tabla 27

Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante cloruro férrico a turbiedad alta (280 UNT)

| RESULTADOS DE ENSAYOS DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN | | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|---|-------|--------------|-------|
| TIPO DE COAGULANTE: | | Cloruro férrico | | | | |
| TURBIEDAD: | | 280 UNT | | | | |
| PARÁMETROS INICIALES: | | | | | | |
| pH: 7.5 unid pH | | Temperatura: | | 26°C | | |
| CONDICIONES DE MEZCLA: | | | | | | |
| | Velocidad (RPM) | | Gradiente de velocidad (S ⁻¹) | | Tiempo (min) | |
| Mezcla rápida | 300 RPM | | 600 S ⁻¹ | | 1 min | |
| Mezcla lenta | 40 RPM | | 70 S ⁻¹ | | 20 min | |
| Sedimentación | 0 RPM | | 0 S ⁻¹ | | 10 min | |
| ENSAYO DE LABORATORIO: | | | Dosis óptima | | | |
| | Jarra | Jarra | Jarra | Jarra | Jarra | Jarra |
| | Nº1 | Nº2 | Nº3 | Nº4 | Nº5 | Nº6 |

| | | | | | | |
|---|---------|---------|------------------|---------|---------|--------|
| Dosis (mg/L) | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 |
| Concentración (%): | 1 | | | | | |
| Cantidad (ml/2L): | 3.2 | 4 | 4.8 | 5.6 | 6.4 | 7.2 |
| Turbiedad residual (UNT): | 1.8 | 1.3 | 1.2 | 1.5 | 0.6 | 0.8 |
| % de Remoción: | 99.4 | 99.6 | 99.5 | 99.5 | 99.8 | 99.7 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 2 seg | 1.5 seg | 1.5-2mm /1.8 seg | 2.5 seg | 2.5 seg | 1.5seg |
| Primera RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 1.3 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 0.7 | 0.7 |
| Primera RÉPLICA % de Remoción: | 99.5 | 99.6 | 99.6 | 99.6 | 99.8 | 99.7 |
| Segunda RÉPLICA Turbiedad residual (UNT): | 1.5 | 1.3 | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.6 |
| Segunda RÉPLICA % de Remoción: | 99.5 | 99.5 | 99.6 | 99.5 | 99.5 | 99.4 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2 seg | 1.5-2mm /1.8 seg | 2 seg | 2.5 seg | 1seg |

ENSAYO DE LABORATORIO:

Concentración óptima

| | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 24 | | | | | |
| Concentración (%): | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| Cantidad (ml/2L): | 9.6 | 4.8 | 2.4 | 1.6 | 0.96 | 0.48 |
| Turbiedad residual (UNT): | 1.5 | 1.1 | 0.8 | 0.9 | 1.2 | 1.5 |
| % de Remoción: | 99.5 | 99.6 | 99.7 | 99.7 | 99.6 | 99.5 |

| | | | | | | |
|--|---------|-------|------------------|---------|---------|--------|
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2 seg | 1.5-2mm /1.8 seg | 2 seg | 2.5 seg | 1seg |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 1.7 | 1.3 | 0.6 | 1.0 | 1.8 | 2.1 |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 99.4 | 99.5 | 99.8 | 99.6 | 99.4 | 99.3 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 1.6 | 1.3 | 0.8 | 1.3 | 1.9 | 2.6 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 99.4 | 99.5 | 99.7 | 99.5 | 99.3 | 99.1 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.5 seg | 2 seg | 1.5-2mm /1 seg | 2.5 seg | 1.5 seg | 1.5seg |

Tabla 28

Resultados de ensayo de laboratorio de dosis y concentración óptima con coagulante cloruro férrico a turbiedad alta (60 UNT)

| RESULTADOS DE ENSAYOS DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN | | |
|--|---|--------------|
| TIPO DE COAGULANTE: | Cloruro férrico | |
| TURBIEDAD: | 60 UNT | |
| PARÁMETROS INICIALES: | | |
| pH: 7.5 unid pH | Temperatura: | 26°C |
| CONDICIONES DE MEZCLA: | | |
| Velocidad (RPM) | Gradiente de velocidad (S ⁻¹) | Tiempo (min) |

| | | | |
|---------------|---------|---------------------|--------|
| Mezcla rápida | 300 RPM | 600 S ⁻¹ | 1 min |
| Mezcla lenta | 40 RPM | 70 S ⁻¹ | 20 min |
| Sedimentación | 0 RPM | 0 S ⁻¹ | 10 min |

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| ENSAYO DE LABORATORIO: | Dosis óptima |
|-------------------------------|---------------------|

| | | | | | | |
|---|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
| Dosis (mg/L) | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| Concentración (%): | 1 | | | | | |
| Cantidad (ml/2L): | 1.6 | 2 | 2.4 | 2.8 | 3.2 | 3.6 |
| Turbiedad residual (UNT): | 2.6 | 1.1 | 1.8 | 2.0 | 2.5 | 3.0 |
| % de Remoción: | 95.7 | 98.2 | 97.0 | 96.7 | 95.8 | 95.0 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2 seg | 1.5-2mm /1.8 seg | 2 seg | 2.5 seg | 1seg |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 2.5 | 0.8 | 1.7 | 2.0 | 2.4 | 5.0 |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 95.8 | 98.7 | 97.2 | 96.7 | 96.0 | 91.7 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 2.8 | 1.3 | 0.9 | 1.9 | 2.7 | 8.0 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 95.3 | 97.8 | 98.5 | 96.8 | 95.5 | 86.7 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2 seg | 1.5-2mm /1 seg | 2 seg | 2.5 seg | 1seg |

| | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| ENSAYO DE LABORATORIO: | Concentración óptima |
|-------------------------------|-----------------------------|

| | | | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Jarra N°1 | Jarra N°2 | Jarra N°3 | Jarra N°4 | Jarra N°5 | Jarra N°6 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|

| | | | | | | |
|--|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|
| Dosis (mg/L) | 10 | | | | | |
| Concentración (%): | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| Cantidad (ml/2L): | 4 | 2 | 1 | 0.6 | 0.4 | 0.2 |
| Turbiedad residual (UNT): | 2.0 | 1.5 | 0.9 | 1.5 | 1.9 | 3.0 |
| % de Remoción: | 96.6 | 97.5 | 98.5 | 97.5 | 96.9 | 95.0 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.8 seg | 2.5 seg | 1.5-2mm /1.8 seg | 2 seg | 2.5 seg | 1seg |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 2.8 | 2.0 | 1.1 | 2.3 | 2.9 | 3.0 |
| Primera RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 95.3 | 96.7 | 98.2 | 96.2 | 95.3 | 95.0 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| Turbiedad residual (UNT): | 3.0 | 2.8 | 2.2 | 2.5 | 3.1 | 3.8 |
| Segunda RÉPLICA | | | | | | |
| % de Remoción: | 95.0 | 95.3 | 96.3 | 95.8 | 94.8 | 93.7 |
| Tamaño/tiempo de inicio de floc (seg): | 1.9 seg | 2 seg | 1.5-2mm /1.5 seg | 1.5 seg | 2.5 seg | 1.5 seg |

En las Figuras 39, 40, 41 y 42 se aprecian los resultados de turbiedad residual por jarra a diferentes niveles de turbiedad (Alta, media y baja), esta gráfica permite corroborar la estabilidad las dosificaciones establecidos con la turbiedad residual de acuerdo a la dinámica de demanda de dosificación por carga de turbiedad inicial.

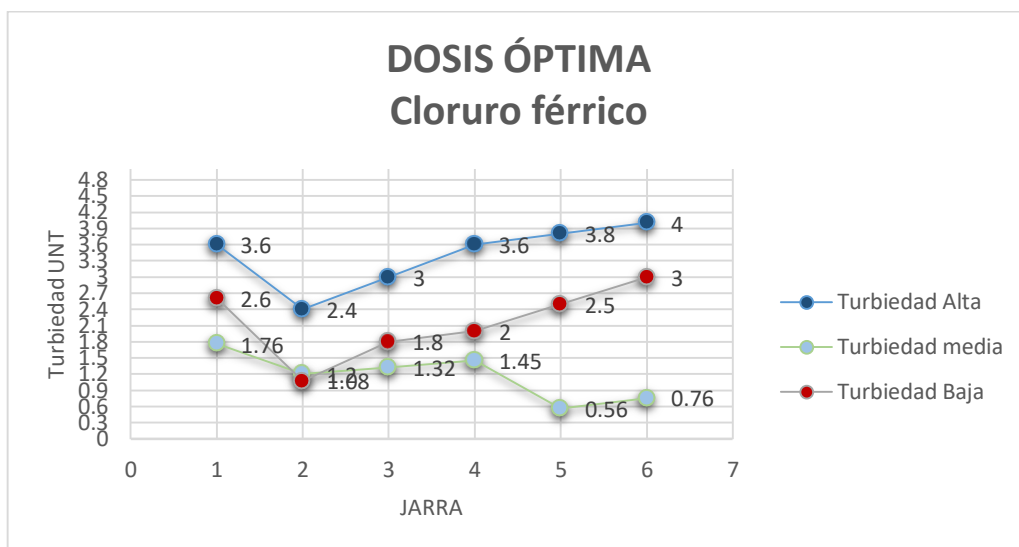


Figura 39. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

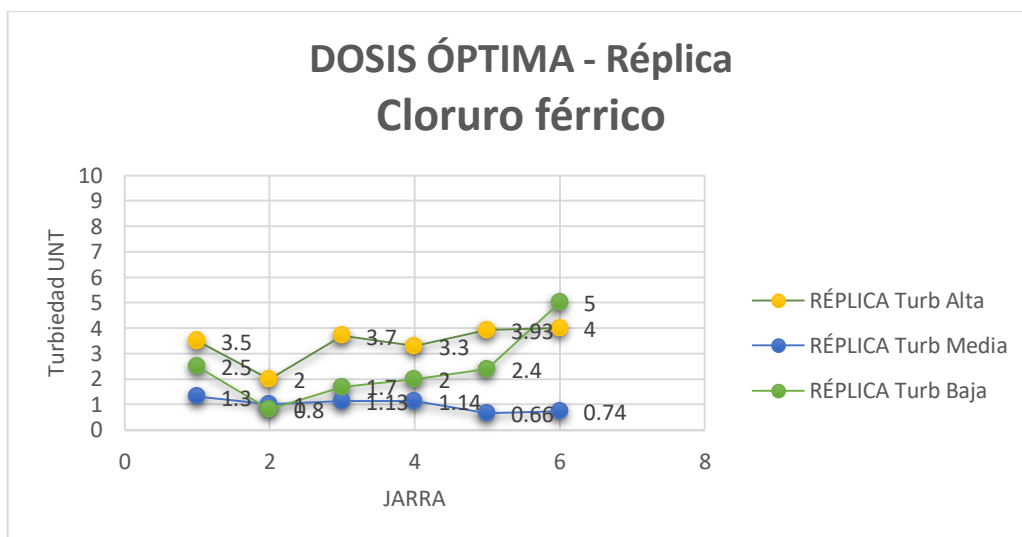


Figura 40. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

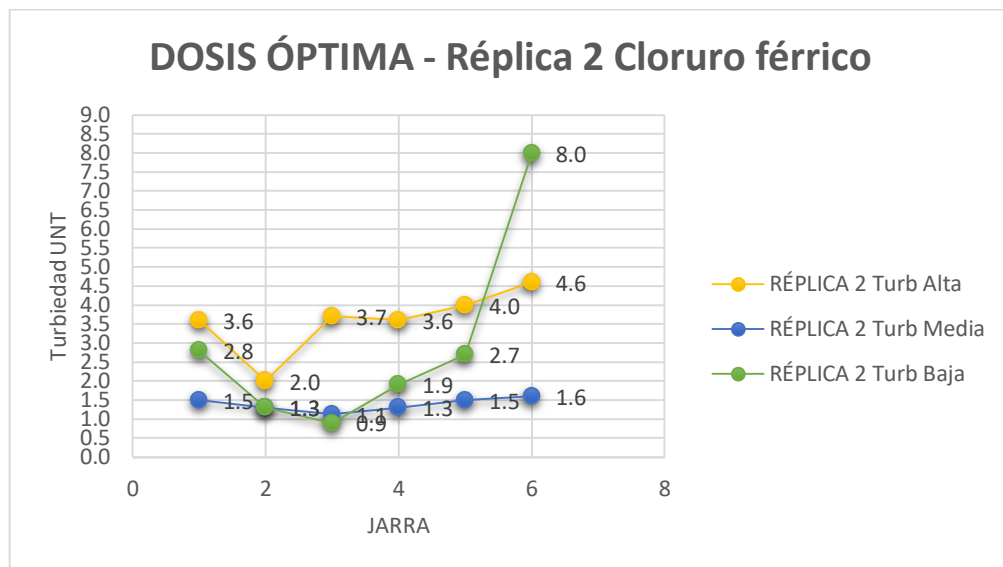


Figura 41. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de dosis óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

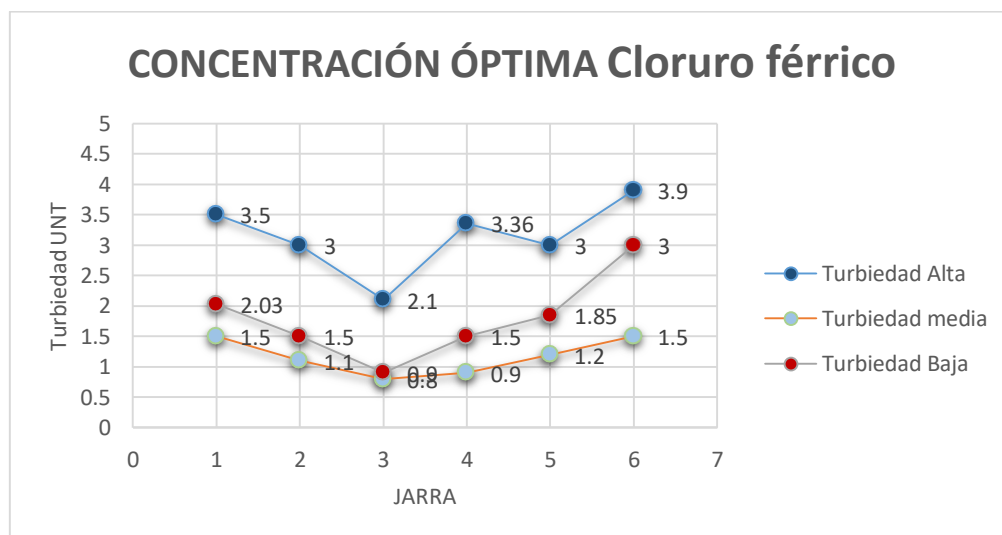


Figura 42. Resultados de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

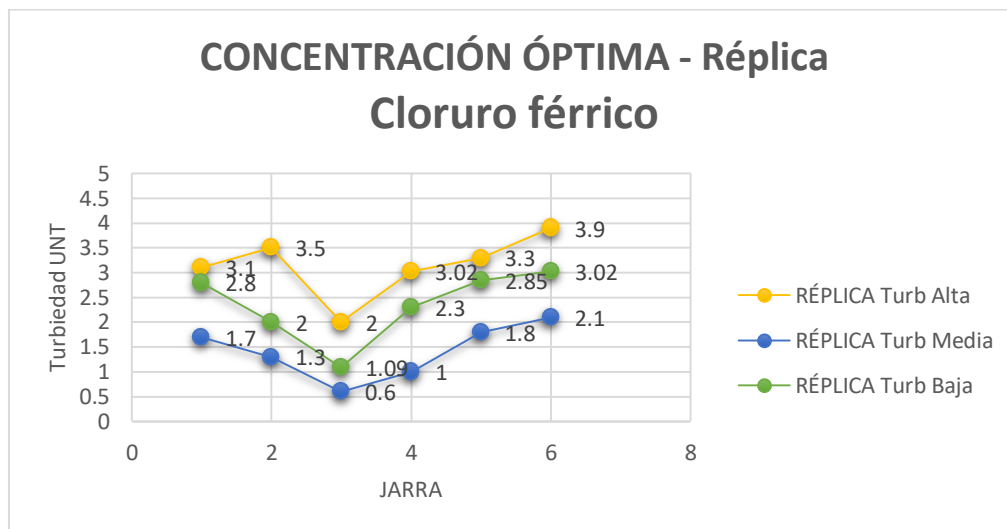


Figura 43. Resultados de la RÉPLICA de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

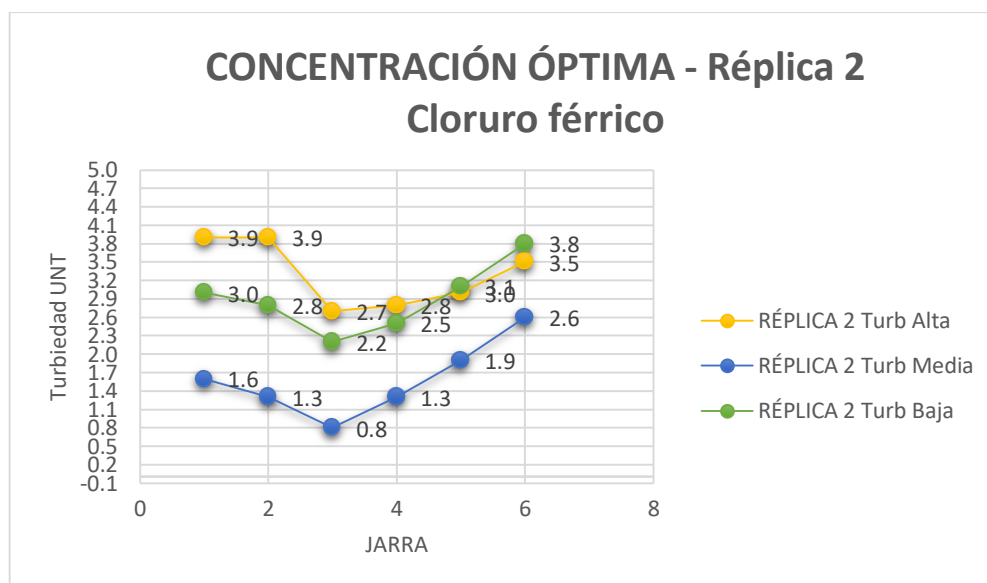


Figura 44. Resultados de la RÉPLICA 2 de turbiedad residual por jarra de prueba de concentración óptima con cloruro férrico con tres niveles de turbiedad (Alta, 400 UNT; media, 280 UNT y baja, 60 UNT)

5. Análisis estadístico

5.1. Prueba de regresión para prueba de jarras

Se ha desarrollado una regresión lineal para los resultados obtenidos de la simulación con el equipo pruebas de jarras que trabaja con 6 vasos a diferentes concentraciones y una dosis ya establecida en pruebas anteriores, además cada ensayo se desarrolla para cada nivel de turbiedad inicial (Turbiedad Alta de 400 UNT, media de 280 UNT y baja a 60 UNT), para tres tipos de coagulantes (metálico de cloruro férrico, mucílago en estado líquido y en polvo), todo ello con dos réplicas.

En la Tabla 29 y Figura 45, se muestra que el Tipo de coagulante tiene mayor significancia entre los valores de turbiedad residual

Tabla 29

Hoja de cálculo ANOVA

| Univariate Tests of Significance for Turbiedad residual (UNT) (Base de datos) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition | | | | | |
|--|-----|-------------------|----------|----------|-----|
| Effect | SS | Dedre. Of Freedom | MS | F | p |
| Intercept | 1 | 48565.29 | 601.7051 | 0.000000 | 1 |
| Tipo de coagulante | 2 | 17428.68 | 215.9346 | 0.000000 | 2 |
| Turbiedad inicial (UNT) | 2 | 2.77 | 0.0343 | 0.966272 | 2 |
| Tipo de coagulante* Turbiedad inicial (UNT) | 4 | 35.23 | 0.4365 | 0.782120 | 4 |
| Error | 153 | 80.71 | | | 153 |

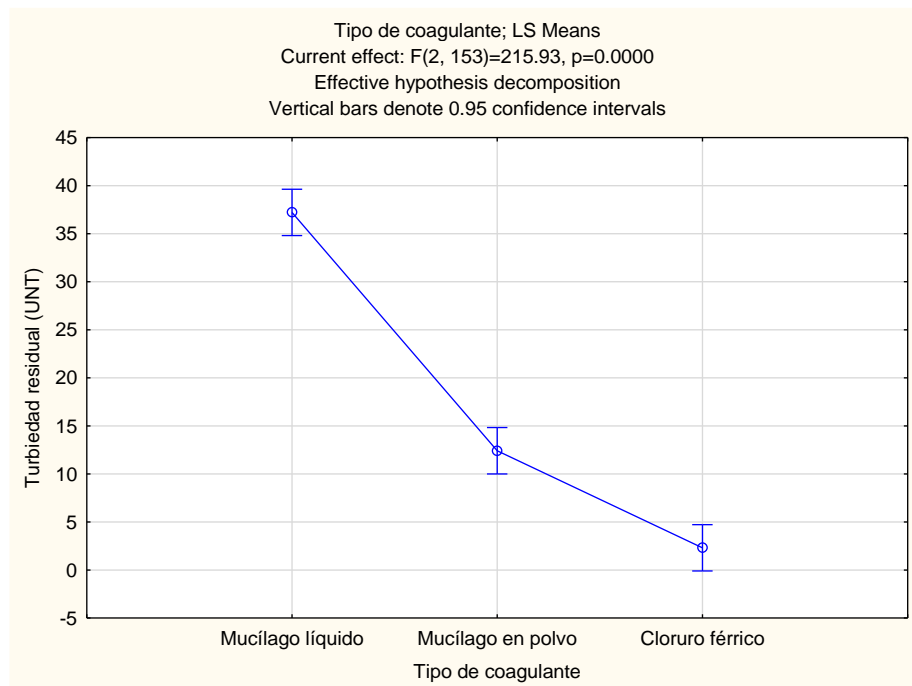


Figura 45. Efecto de la turbiedad residual (UNT) en los tres diferentes coagulantes

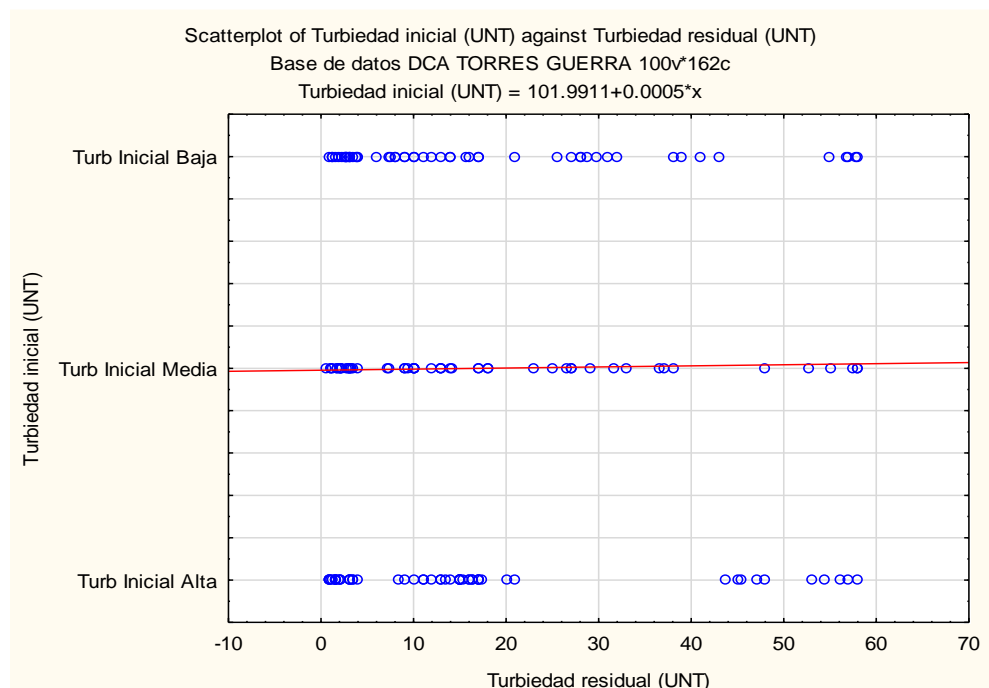


Figura 46. Regresión lineal

En la Figura 46 observamos que los datos cumplen con el supuesto de la relación entre las variables siguiendo una proyección lineal.

5.2. Supuesto de normalidad

El supuesto de normalidad se logra haciendo un histograma residual, y los datos que siguen una distribución normal están próximos a la diagonal, aceptando la Ho. (Montgomery, 2004). Se plantea las siguientes hipótesis para conocer si los datos se ajustan a una distribución normal:

Ho: Los datos siguen una distribución normal

Ha: Los datos no siguen una distribución normal

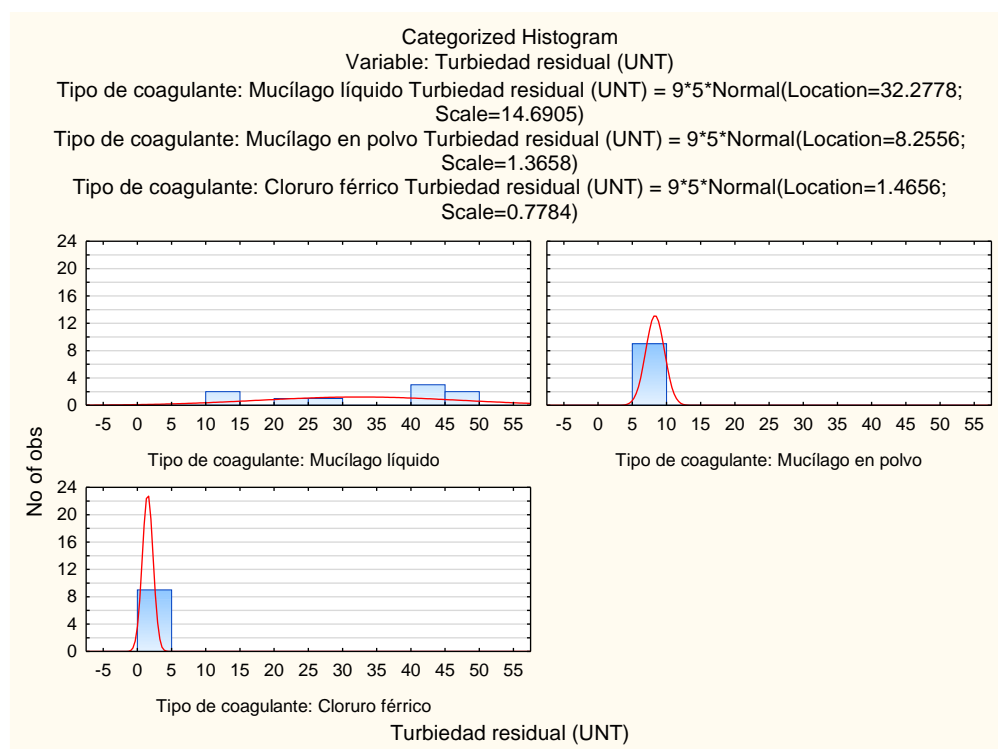


Figura 47. Gráfica de prueba de normalidad

En la Figura 47 de la prueba de normalidad podemos observar que los datos no siguen una distribución normal, por lo que se necesita aplicar un diseño estadístico no paramétrico.

5.3. Diseño estadístico de kruskal wallis

Se aplicó un diseño estadístico de kruskal wallis, prueba no paramétrica análoga y alternativa al análisis de varianza ANOVA, permitió evaluar la influencia del tipo de coagulante en el tratamiento de agua sobre la turbiedad residual. Este diseño asume que la variable tiene una distribución continua y requiere que esté medida en una escala ordinal.

La hoja de cálculo ANOVA by Ranks de Kruskal-Wallis se en la Tabla 30.

Tabla 30

Hoja de cálculo ANOVA by Ranks de Kruskal-Wallis

| Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks; Turbiedad residual (UNT) | | | | |
|---|---|---------|--------------|-----------|
| Depend.: | (VERSION 2) | | | |
| Turbiedad residual (UNT) | Independent (grouping) variable: Tipo de coagulante | | | |
| | Kruskal-Wallis test: H (2, N= 27) =23.18532 p =.00001 | | | |
| | Code | Valid N | Sum of Ranks | Mean Rank |
| Mucílago líquido | 101 | 9 | 207.0000 | 23.00000 |
| Mucílago en polvo | 102 | 9 | 126.0000 | 14.00000 |
| Cloruro férrico | 103 | 9 | 45.0000 | 5.00000 |

La prueba de Kruskal-Wallis es altamente significativa ($p = .00001$). Por lo tanto, puede concluir que las actuaciones de los diferentes grupos experimentales fueron significativamente diferentes entre sí. Recordando que la prueba de Kruskal-Wallis es básicamente un análisis de varianza realizado en rangos, es por ello que la suma de rangos se muestra en la Figura 8; en el que la suma de rango más alto (Mean Rank) será el que tenga el peor desempeño como es el caso de la condición de mucílago líquido en el que el método de extracción fue por maceración con 207.0000; mientras que, la suma de rango más baja (mejor rendimiento) aparece en la condición de cloruro férrico, que se esperaba ya que es el método convencional. Sin dejar de lado, el coagulante de mucílago en polvo obtuvo un valor promedio (45.0000) en comparación a los otros dos.

Factor: Tipo de coagulante

Ho: El tipo de coagulante **no** influye en la remoción de turbidez del agua.

Ha: El tipo de coagulante influye en la remoción de turbidez del agua.

De acuerdo las hipótesis planteadas y el p-valor obtenido rechazamos la Ho, aceptando la Ha en que el tipo de coagulante influye en la remoción de turbidez del agua.

5.4. Análisis de Resultados de la prueba de mediana

En la prueba de la mediana se demuestra que es significativo con un valor de $p = 0,0001$. La Tabla 31 muestra el número de resultados (turbiedad residual) en cada condición experimental que están por debajo o igual (\leq) o mayor ($>$) que

la mediana común (*median*). El tipo de coagulante que un desempeño menor a la media es Mucílago líquido; mientras que el Cloruro férrico muestra el mejor.

Tabla 31

Prueba de mediana

| Median Test, Overall Median = 8.30000; Turbiedad residual (UNT) (VERSION 2) | | | |
|---|---|-------------------|-----------------|
| Dependent: | Independent (grouping) variable: Tipo de coagulante | | |
| Turbiedad residual (UNT) | Chi-Square = 18.09890 df = 2 p = .0001 | | |
| | Mucílago líquido | Mucílago en polvo | Cloruro férrico |
| <= Median: observed | 0.00000 | 5.000000 | 9.00000 |
| expected | 4.66667 | 4.66667 | 4.66667 |
| obs.-exp. | -4.66667 | 0.333333 | 4.33333 |
| > Median: observed | 9.00000 | 4.000000 | 0.00000 |
| expected | 4.33333 | 4.333333 | 4.33333 |
| obs.-exp. | 4.66667 | -0.333333 | -4.33333 |
| Total: observed | 9.00000 | 9.000000 | 9.00000 |

En la Figura 48 se representa de manera gráfica los rangos de niveles más bajos de turbiedad residual alcanzados en los ensayos con los tres coagulantes, siendo para fines de calidad de agua e importancia sanitaria se destaca la menor cantidad de turbiedad. Y en la Figura 49 se grafica el porcentaje de remoción obtenidos en base a la turbiedad inicial y turbiedad residual por cada coagulante. El análisis entre turbiedad residual y Porcentaje de remoción será inversamente

proporcional ya que mientras menor sea el valor de turbiedad alcanzado mayor será su rendimiento.

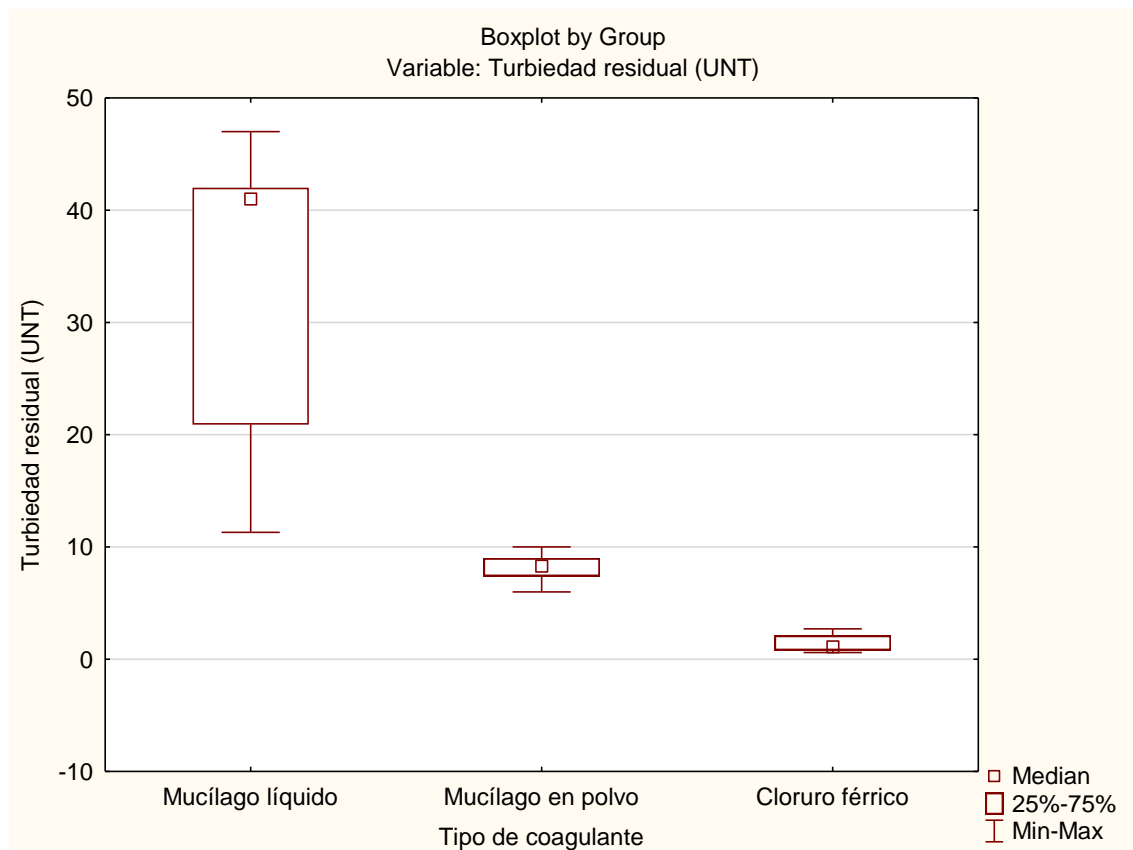


Figura 48. Rangos de niveles más bajos de turbiedad residual alcanzados con los diferentes coagulantes.

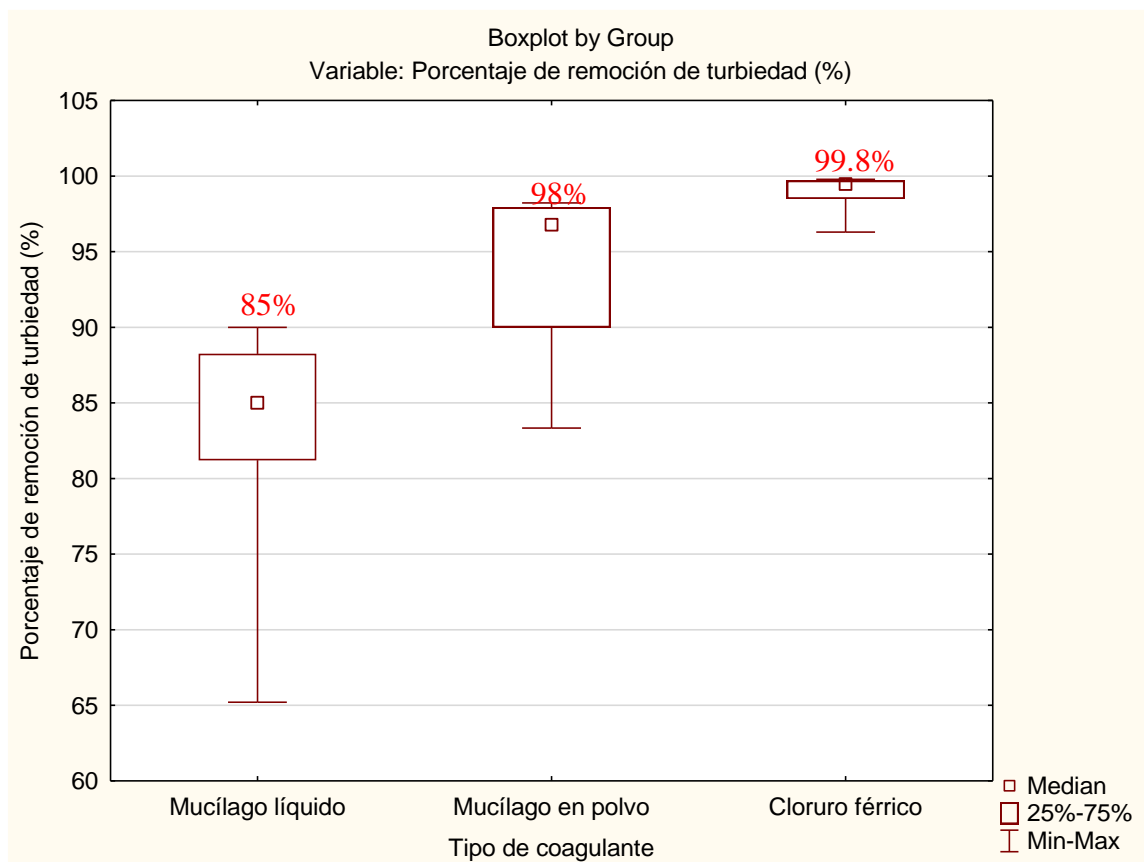


Figura 49. Porcentaje de remoción de turbiedad con tres coagulantes

En el análisis de la distribución de las variables dependientes de las Figuras 49 y 50 se deduce que los menores valores de turbiedad residual (menores de 3 UNT) y eficiencia de 99.8% fueron obtenidos con el tratamiento convencional de agua con cloruro férrico, seguido del coagulante de mucílago en polvo (rango de 10 a 7 UNT) con 98% de eficacia de remoción; mientras que, el mucílago líquido logra el menor rendimiento con rangos de 55 a 12 UNT con 85% de remoción.

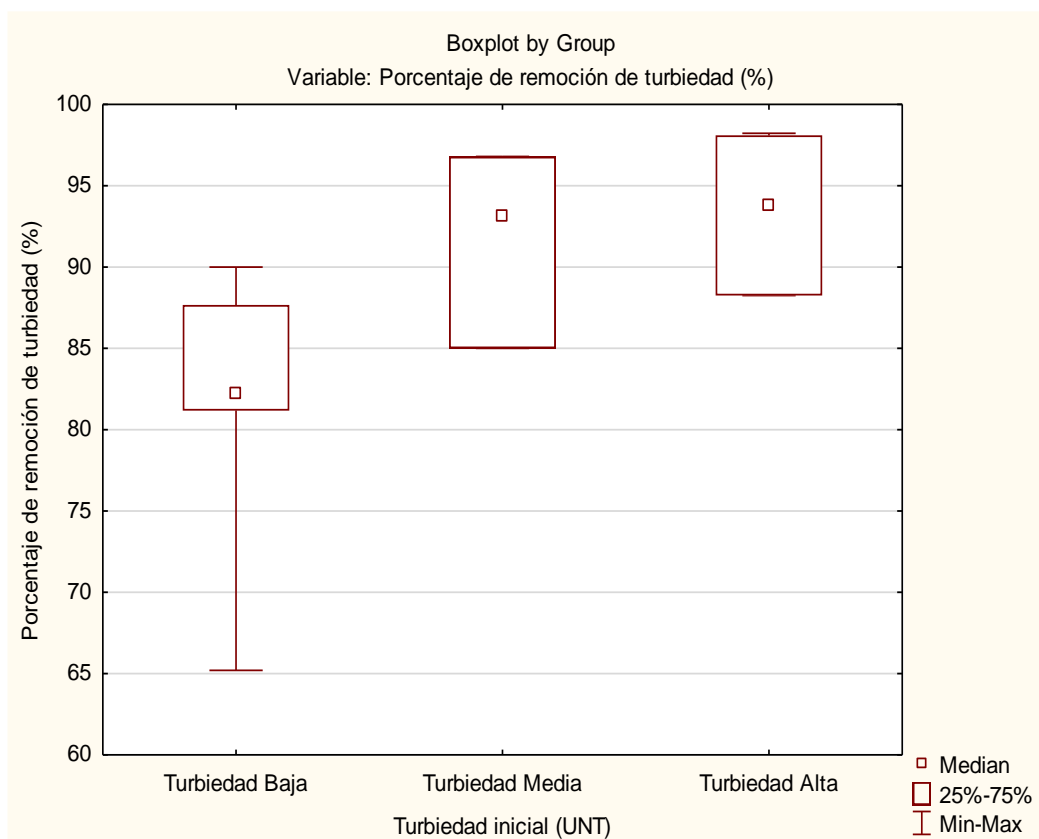


Figura 50. Porcentaje de remoción de acuerdo a la turbiedad inicial (alta, media y baja) para los dos métodos de extracción de mucílago (en polvo y líquido por maceración).

Esta gráfica permite corroborar la estabilidad de dosificaciones dinámica de demanda por carga de turbiedad inicial. De acuerdo a Barrenechea (2009), que explica la influencia de las características de concentración de coloides:

La alta concentración de coloides permite una mayor probabilidad de adherencia en contacto con el coagulante, desestabilización seguida de la sedimentación por aglomeración y ganancia de peso.

La baja concentración de coloides requiere de una dosis mayor para el contacto interparticular necesaria para la desestabilización.

En la Tabla 32 se aprecia que existe mayor porcentaje de remoción de turbiedad para el coagulante de mucílago en polvo; a niveles de turbiedad inicial de 400 UNT con 96.9%, seguido por turbiedad inicial media de 280 UNT con 95.0 % y finalmente la eficiencia de remoción reduce en niveles de turbiedad baja de 60 UNT siendo ésta de 82.1 %; esta gráfica permite corroborar la estabilidad de dosificaciones establecidos para la turbiedad residual de acuerdo a la dinámica de demanda de dosificación por carga de turbiedad inicial. De acuerdo a Barrenechea (2009), que explica la influencia de las características de concentración de coloides en la coagulación, la alta concentración de coloides permite y una mayor probabilidad de adherencia y contacto con el coagulante, desestabilización seguida de la sedimentación por aglomeración y ganancia de peso; mientras que, a una baja concentración de coloides requiere de una dosis mayor para el contacto interparticular necesaria para la desestabilización.

Tabla 32

Resumen de resultados de turbiedad residual y porcentaje de remoción a tres diferentes coagulantes y tres niveles de turbiedad inicial

| Nivel de turbiedad inicial | Mucílago en líquido | Mucílago en polvo | Cloruro férrico |
|----------------------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Turbiedad Alta | 52.7 UNT | 12.4 UNT | 3.2 UNT |
| 400 UNT | 86.8 % | 96.9 % | 99.2 % |
| Turbiedad Media | 36.7 UNT | 14.1 UNT | 1.4 UNT |
| 280 UNT | 86.9 % | 95.0 % | 99.5 % |
| Turbiedad Baja | 22.3 UNT | 10.8 UNT | 2.3 UNT |
| 60 UNT | 62.8 % | 82.1 % | 96.1 % |

*Guías de la EPA para riego en áreas verdes en la categoría de Riego en áreas verdes restringidas al público (Turbiedad < 30 UNT)

Las pruebas de tratabilidad de agua son necesarias para determinar parámetros condiciones de operación óptimas como los de dosis y concentración, ya que permite hacer ajustes en el pH, selección del coagulante, variar la cantidad para determinar la dosificación óptima, y alternar gradientes de velocidad necesarias para la mezcla, tiempo de mezcla, así como la de sedimentación. Todo ello correspondiente a la remoción de turbiedad en el agua en el que radica la importancia sanitaria que por sus componentes arcillosos y orgánicos adsorben otros compuestos como plaguicidas, fomenta un mayor desarrollo de los

microorganismos patógenos, bacterias, virus, algas y sustancias que producen sabor y olor en algunos casos; que se introducen dentro de las partículas, esta superficie sirve para que éstos se alimenten y reproduzcan, protegiendo de los desinfectantes. Es así entonces que eliminando la turbidez se eliminan los demás compuestos.

Barrenechea (2009) asevera que el Cloruro férrico es un coagulante que permite eliminar en gran cantidad sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados del agua, también que si el coagulante excede en la dosificación el resultado no sería el esperado y sería imposible la clarificación de dicho líquido, además de elevar la turbidez. El cloruro férrico, se aplica con mayor capacidad de arrastre, es más efectivo en la remoción de partículas coloidales, metales, sulfuros y fosfatos; conduce a un tamaño suficiente de los flóculos que precipitan más fácilmente. Por otro lado, el mucílago de *Opuntia ficus indica* requiere de mayor cantidad de dosis para lograr la formación de flóculos acelerando la sedimentación de los coloides eficiencia de remoción (98.2%) a la del coagulante químico (99.8%), pero llega a sustituirlo completamente ya que logra niveles de turbiedad residual óptimos de acuerdo a las Guías de la EPA para riego en áreas verdes en la categoría de Riego en áreas verdes restringidas al público (Turbiedad < 30 UNT); por otro lado en la normativa peruana los Estándares de calidad ambiental (ECA) aprobado con Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM en la categoría para uso de riego no contempla el parámetro de calidad turbiedad.

Asimismo la dosificación en la coagulación con mucilago a utilizar, tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, siendo que una menor cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflóculos es muy escaso, por lo tanto, la turbiedad residual es elevada (Bravo & Gutiérrez, 2015); mientras que, una alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación muy bajas o la reestabilización porque éstos vuelven a colisionar pero esta vez se rompen las adherencias, por lo tanto, la turbiedad residual es igualmente elevada (Silva, 2017).

Sobre la proporción de la dosis con la turbidez inicial Gregory & Duan, (2001) (como se citó en Brito, 2007) menciona que la dosis óptima para el agua aumenta a medida que aumenta la turbidez inicial es un comportamiento incompatible con un mecanismo de floculación de barrido, pero es consistente con la adsorción y la neutralización de carga, así como mecanismos de adsorción y puente. El mecanismo de coagulación predominante para *Opuntia* es adsorción y puente, que son propios de la coagulación con polímeros ya que se espera una relación estequiométrica entre la concentración de partículas y la dosis de coagulante (Silva, 2017).

El proceso de coagulación con uso de polímeros debe tener especial cuidado en parámetros como la gradiente de velocidad y una excesiva cantidad en la dosificación, ya que por la naturaleza del compuesto que Saenz, et.al, (2004)

(como se citó en Silva, 2017), atribuye la capacidad de coagulación de la *Opuntia ficus indica*, a la presencia del mucilago, que es un complejo viscoso con la capacidad de retener agua, hecha de moléculas de carbohidratos tales como: arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa y ácido galacturónico éste último considerado como el responsable de la formación de puentes químicos en la floculación; entonces los coloides pueden tener una reestabilización de la suspensión (Díaz, 2014); además, el funcionamiento es por el fenómeno de la teoría del puente, donde las moléculas del polímero muy largas contienen grupos químicos como el ácido galacturónico contenido en el mucílago como lo ha demostrado Choy et al. (2014), que pueden absorber las partículas coloidales en una de sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para adsorber otras partículas; por eso se dice que forman el puente entre las estas partículas que son susceptibles a la reestabilización en algún cambio de condiciones (Silva, 2017). Las propiedades coagulantes presentes en la *Opuntia ficus-indica* poseen menor densidad de carga en comparación con coagulantes químicos como cloruro férrico y aluminio, según lo establece la ley de Schulze Hardy, donde el efecto desestabilizador de los coloides se incrementa conforme mayor sea la carga de la contracción añadido (Arboleda, 2000).

En complemento Samame (2016) indica que el grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación

debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecha y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente (Silva, 2017). En las pruebas se ha tenido dos escenarios de condiciones de mezcla rápida ya que los polímeros al tener enlaces de adherencia débiles tienden a la reestabilización y por ello requiere de gradientes de velocidad menores 190 s^{-1} de gradiente que equivale a 100 RPM en el equipo de prueba de jarras a las del cloruro férrico que fue de 300 RPM en las pruebas de laboratorio que corresponden a 600 s^{-1} para el diseño del Canal Parshall.

Silva (2017) con un método de extracción en polvo con uso de solvente alcohol, centrifuga y estufa, obtuvo resultados para cada valor de turbidez inicial de 1000 UNT y 500 UNT porcentajes de remoción 78.7 y 88.9 % respectivamente; mientras que, en esta investigación con la extracción de mucílago en polvo a niveles de turbiedad de 400, 280 y 60 UNT se ha obtenido 98.2, 96.4 y 87.7% de eficiencia; por otro lado con el método de extracción en liquido se ha alcanzado 88.3, 89.6 y 81.2 %, ambos a situaciones de prueba de jarras con condiciones de mezcla iguales. El proceso de extracción de mucilago que usó Silva requirió de mayores recursos; mientras que, en el aplicado en esta investigación se desarrolló con procesos de macerado previo y a la hora de uso, estufa, molido y tamizado obteniendo un compuesto en polvo y que en el proceso mayor eficiencia.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se ha logrado evaluar la remoción de turbiedad de agua del canal de riego mediante el proceso de coagulación-floculación por dos métodos de extracción de coagulante de mucílago de *Opuntia ficus-indica* a escala laboratorio, a través del diseño de las pruebas de tratabilidad para determinar la dosis y concentración óptima.

El diseño estadístico kruskal wallis ha permitido determinar si los factores inciden en la variable de estudio y poder establecer si las condiciones han sido óptimas. En base a esto el análisis del diseño experimental concluye que el factor más influyente es el tipo de coagulante a usar y de acuerdo a los niveles de turbidez residual alcanzados se podrá sustituir el uso de un coagulante químico con mucilago de *Opuntia ficus-indica* en polvo en el tratamiento del agua del canal de riego; aplicando el método de extracción por maceración con agua destilada 1:1 licuado y secado a 120°C por 6 horas y otras 6 h a 60°C para luego triturarlo a un diámetro menor a 0.5mm, su eficiencia ha sido probado través de un análisis de Jarras, a condiciones de temperatura de 26°C, pH rango de 7.3-7.5, mezcla de coagulación de 100 RPM por 1 min, velocidad de floculación de 40 UNT por 20 min y sedimentación por 10 min en turbiedad inicial alta (400 UNT) obteniendo valores promedios de 12.4 UNT con porcentajes de remoción de 96.9% con dosis 4mg/L al 5%; a turbiedad inicial media (280 UNT) 95% de remoción con turbidez residual de

14.1 UNT con dosis 3 mg/L al 5% y para turbidez inicial baja (60 UNT) la remoción es de 82.1% (10.8 UNT) con dosis de 20 mg/L; y en menor escala de eficiencia el mucilago con método de extracción en líquido alcanzó un 88.3% (47 UNT turbidez residual) en turbiedad inicial alta, 89.6% (29 UNT) turbiedad inicial media y 81.2 % (11.2 UNT) turbiedad inicial baja.

Los valores residuales de turbidez obtenidos cumplen con las características mínimas exigidas por el EPA de riego en áreas verdes restringidas al público (Turbiedad < 30 UNT) siendo el menor valor obtenido en los ensayos con mucílago en polvo 5.3 UNT y el mayor 18 UNT, existiendo que para tales fines de uso de riego de áreas verdes no requiere tratamiento adicional; además el uso con polímero ahora es idóneo para este fin.

Con el fin de priorizar el uso más rígido como es el de agua potable, el reúso de agua contaminada tratada serán rentables siendo más accesible la obtención del metro cúbico de agua regenerada con la aplicación de este compuesto como alternativa sostenible, eficiente en el proceso de coagulación y floculación, respetuosas con el ambiente por su naturaleza biodegradable, con abundante fuente de obtención, precio relativamente bajo, reducción del riesgo de contaminación ambiental y eliminación del riesgo tóxico para el ser humano; por consiguiente se mejora la situación sanitaria y condiciones de bienestar de la población universitaria afectada por áreas verdes contaminadas con agua residual, complementariamente es conveniente para un manejo ambiental económico, seguro y eficiente en el uso de agua tratada al minimizar el impacto ambiental

derivado del uso de coagulantes químicos convencionales como cloruro férrico; ya que al ser un producto orgánico resulta inocuo para el uso del agua tratada y por ende para el medio ambiente.

Entonces dentro de algunas estrategias para reducir el impacto medioambiental sobre la calidad del agua es la evaluación de alternativas para obtener una producción más limpia, el usar tecnologías sostenibles y ecológicamente racionales; y la selección de tecnologías óptimas para el tratamiento de las aguas residuales. Más allá de asegurar un uso razonable, social, equitativo y eficiente del agua como recurso, se garantice una gestión sostenible de los ríos y ecosistemas acuáticos. respetuosas con el ambiente por su naturaleza biodegradable, con abundantes fuentes de obtención, precio relativamente bajo, reducción del riesgo de contaminación ambiental y eliminación del riesgo tóxico para el ser humano; por consiguiente mejorar la situación sanitaria y condiciones de bienestar de la población universitaria afectada por áreas verdes contaminada, complementariamente es conveniente para un manejo ambiental económico, seguro y eficiente en el uso de agua tratada al minimizar el impacto ambiental derivado del uso de coagulantes químicos convencionales como cloruro férrico, entre otros; cuyo uso trae desventajas asociadas a altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo y el hecho de que afectan el pH del agua tratada. Adicionalmente con el tratamiento del agua del canal que se usa para riego se estará cumpliendo la norma del EPA (nivel de turbiedad < 30 UNT para este fin).

La UPeU cuenta con 202434 m² de área en el año 2016 y 33.74 m² de área verde/persona, y lo que se requiere según recomendaciones de la OMS, como mínimo, entre 10 y 15 metros cuadrados de área verde por habitante, por lo que para los fines de una universidad saludable es lo ideal mantener estas cifras puesto que a lo largo de los años se ha ido reduciendo paulatinamente en un 55% desde el año 1945.

5.2. Recomendaciones

Estudiar el comportamiento de otros parámetros físico-químicos de calidad de agua como DBO, DQO, diferentes niveles de pH, temperaturas de acuerdo a la costa, sierra o selva; ya que la variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; además de estudios a diferentes concentraciones de un contaminante específico y determinación de isothermas de adsorción u obtener cotas de saturación del biopolímero.

Estudiar la composición y cantidad de lodos generados en los ensayos de coagulación-floculación con coagulantes en base de polímeros en comparación con coagulantes químicos para determinar el método de disposición y tratamiento de estos residuos.

Estudio acerca de la determinación de riesgo bacteriológica al aplicar el tratamiento coagulación-floculación con coagulante producto del método de

extracción por maceración ya que es susceptible al ataque microbiano debido a su alta actividad de agua.

Optimizar el método de extracción e implementar sistemas de gestión de calidad en el proceso, además de realizar la caracterización del mucílago extraído por micrografías a diferentes magnificaciones.

Desarrollar un análisis costo-beneficio para la implementación del tratamiento en el canal de riego del campus y costos de producción del mucílago.

Desarrollar un estudio sobre el tiempo de biodegradación del material.

Considerar la incidencia del contenido de materia orgánica en el agua resultante del tratamiento con coagulantes de mucílago, por su repercusión en la formación de trihalometanos en la cloración para tratamiento de agua potable.

6. Referencias

- ACIDEKA. (2010). Ficha de seguridad del cloruro férrico 40%, 1–12.
- ANA. (2016). Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. Sedapal, pág.1-44. Recuperado a partir de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Andrade, S., & Tipán, E. (2016). Determinación de la eficiencia de las características de coagulantes y floculantes del *Tropaeolum Tuberosum* en el tratamiento de agua cruda de la planta de Puengasí de la EPMAP. Recuperado a partir de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13682/1/UPS-ST002964.pdf>
- Anónimo. (1999). Evaluación de la calidad de agua de la cuenca del río Rímac y determinar los riesgos e impactos por metales pesados en los suelos, aguas y hortalizas en la localidad de Carapongo., pág. 11-28.
- Antillón, J. J., Camareno, M. V., & Bustos, N. Q. (2012). Evaluación de la *Opuntia ficus-indica*(*Opuntia Cochenillífera*) para la remoción del color en agua potable. Tecnología En Marcha, 42(4), 55–62. Retrieved from <file:///C:/Users/Miqueas/Downloads/Dialnet-EvaluacionDeLaTunaOpuntiaCochenilliferaParaLaRemoc-4835667.pdf>

- Arboleda, J. (2000). Teoría de la Coagulación del Agua. Teoría y práctica de la purificación del agua, pág. 793.
- Baltodano, E., & Millones, E. (2013). Estudio de la concentración del mucílago de vegetales en la velocidad de floculación del relave de la concentradora Chota-Motil. Universidad Nacional de Trujillo.
- Barrenechea, A. (2009). Coagulación. CEPIS.
- Bravo, M., & Gutiérrez, J. L. (2015). Remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica de la aguas del Río Pollo de Otuzco empleando semillas de *Caesalpinia spinosa* (Tara).
- Brito, N. V. (2007). Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la aplicación del aeropuerto internacional de la ciudad de México, pág. 135.
- Cáceres, K. (2016). Beneficios ambientales del control de pérdidas en un sistema convencional de tratamiento de agua potable. Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado a partir de https://es.wikipedia.org/wiki/Pontificia_Universidad_Católica_del_Perú
- Carhuamaca, Z. (2013). Estudio de la reducción del contenido de lactosa del lactosuero producido por las industrias lácteas utilizando mucílago nopal (*Opuntia ficus indica*). Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Carranza, C. C., & Calla Llontop, H. J. (2010). Calidad del agua en la cuenca del río Rímac , sector de San Mateo , afectado por las actividades mineras Water quality in the basin the Rimac river , sector of san mateo , affected by mining activities, 13, 87–94.

- Carrasco, C. A. (2007). Tratamiento físico químico de aguas residuales. Universidad de Chile, 48–54.
- Choque Q., Y. (1890). Optimización de la capacidad floculante de dos especies de cactáceas en el tratamiento de aguas residuales, pág. 145.
- Choque, D., Choque, Y., Solano Reynoso, A., & Ramos Pacheco, B. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua
Capacity flocculant of natural coagulants in water treatment. Scielo, 298–309.
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., & Ramanan, R. N. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. Journal of Environmental Sciences, 26, 2178-2189. doi:10.1016/j.jes.2014.09.024
- Constitución política del Perú. 29 de diciembre de 1993. Congreso Constituyente Democrático. Diario oficial el peruano.
- Córdoba, A. B. (2013). Implicación de coloides y nanopartículas en la migración de contaminantes en el medio ambiente.
- Cruz, M. A. M. (s. f.). Abastecimiento de aguas, pág. 1-34.
- Díaz, J. (2014). Coagulantes - floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas. Universidad Pedagógica Nacional.
- DIGESA. (2007). Protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales.

- DS-004-2017-MINAM. (2017). Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM - Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Diario Oficial El Peruano, 569076–569082. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/12/Decreto-Supremo-N°-004-2017-MINAM.pdf>
- Enrique, R., Verbel, O., Darío, I., Martínez, M., & Aguas, R. (2014). Utilización de *Opuntia ficus-indica* como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. AVANCES Investigación en Ingeniería, 11(1), 70-75. Recuperado a partir de <http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances-11/art7.pdf>
- FAO. (2018). Utilización de aguas residuales urbanas para el riego de árboles y bosques. Recuperado a partir de <http://www.fao.org/docrep/w0312s/w0312s09.htm>
- Fernández, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. (s. f.). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.
- Fernández, S. (2015). Tratamiento y disposición de aguas residuales de plantas de tratamiento de agua potable en Chile. Universidad de Chile, 120.
- Gabriela, E., & Jaramillo, C. (2015). Estudio de las características de los coagulantes y floculantes de polímeros orgánicos naturales extraídos de materiales de desecho alimenticio, para la potabilización del agua.
- Gallo, J., & Uribe, J. (2003). Reutilización de lodos de planta de potabilización en el tratamiento de aguas residuales. Universidad Nacional de Colombia, 21–22.ANA. (2018). Resolución Jefatural N°056-2018-ANA. Lima, Perú. Recuperado a partir de <http://www.ana.gob.pe/normatividad/rj-056->

2018-ana

García-montalvo, I. A. (2018). The aluminum used in wastewater treatment and its possible relationship with Alzheimer' s disease, (January).
<https://doi.org/10.19280/jonnpr.1704>

Guadalupe Z., M. (2012). Coagulación optimizada en el tratamiento de potabilización de agua: Su efecto sobre la remoción de enteroparásitos.

Guardado, O., & Hernández, A. (2017). Evaluación de la efectividad de floculantes naturales en el tratamiento de aguas residuales provenientes de lavandería industrial, utilizando el cladodio de nopal (*Opuntia ficus-indica*) y la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*). *Universidad de El Salvador*.

Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *U.D.C.A Act. & Div. Cient*, 16(1), 253-262. Recuperado a partir de
<http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v16n1/v16n1a29.pdf>

Idrovo, C. (2011). Optimización de la Planta de tratamiento de Uchupucun. Conocimientos, actitudes y prácticas de los pacientes con diagnóstico de diabetes mellitus tipo 2 que acuden a la fundación DONUM de la ciudad de cuenca, pág. 1-130.

León, F. (2010). Secado por aspercion del mucilago del nopal (*opuntia ficus indica*) y su efecto en las propiedades reologicas de los polvos reconstituidos. Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca

Ley N°29338. 14 ene. 2010. Reglamento de ley de recursos hídricos. ANA. Diario oficial el peruano. Recuperado a partir de http://www.iproga.org.pe/descarga/reglamento_29338.pdf

Marieli, Y., García, M., Mendoza, I., González, Y., & Fuentes, L. (2011). Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de opuntia wentiana. *Ciencia exactas, naturales y agropecuarias*, 1, 27–33.

Marín, R. (2011). Características físicas, químicas y biológicas de las aguas. Emacsa, ©, 1-37. Recuperado a partir de http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48101/componente48099.pdf

Méndez, C., Flores, J., Rangel, J., & Yañez, L. (2012). Modificación de biopolímero extraído de nopal (*Opuntia ficus indica*) y su aplicación para la remoción de metales pesados en agua. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C., (San Luis Potosí).

Montgomery. (2004). Diseño y análisis de experimentos. (L. Wiley, Ed.) (Segunda ed). México: Limusa Wiley.

Morejón, T. D. E. (2017). Utilización del mucílago de *Opuntia ficus-indica* (*Opuntia ficus-indica*) en el mejoramiento de la calidad del agua de consumo humano, en la comunidad de Pusir Grande, provincia del Carchi. Universidad técnica del norte.

- Moscoso-Cavallini, J. C. (2011). Estudio de opciones de tratamiento y reúso de aguas residuales en Lima Metropolitana, pág. 90. Recuperado a partir de http://www.lima-water.de/documents/jmoscoso_informe.pdf
- Mosquera, E. (2014). Almidón extraído de la yuca (*Manihot Esculenta Cratz*) como coagulante alternativo para tratamiento del agua de la quebrada y amuesquer municipio de Potosí.
- Muñoz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales. Univerisdad autónoma del estado de Hidalgo.
- Oliveros R., A., & Moscote V., E. (2016). Evaluación de la efectividad de la *Opuntia ficus-indica* como coagulante para la remoción de turbidez en la cuenca alta del río Guatapuri.
- OMS (2011). Informes sobre la salud en el mundo. Organización mundial de la salud. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs255/es/>
- OMS. (2015). Parámetros de calidad para el uso de aguas residuales. Guías de calidad de efluentes para la protección de la salud. The effects of brief mindfulness intervention on acute pain experience: An examination of individual difference, 1, 13. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- ONU (2017). ODM 7: Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente. Sistema de la Naciones Unidas en el Perú. Recuperado de <http://onu.org.pe/los-odm-en-el-peru/odm-7-garantizar-la-sostenibilidad-del-medio-ambiente/>
- Quispe J., H. (2013). Aplicación del mucílago extraído de nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) en la clarificación del agua Río Uchusuma.

- Ramírez, H., & Jaramillo, J. (2015). Agentes naturales como alternativa, pág. 136-153.
- Romero, V., Romero, C., Solórzano, R., Abreu, O., Brizuela, L., & Pérez, Z. (2007). Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua. *INGENIERÍA UC*, 14(3), 16–23. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70711260003>
- Samame V., J. (2016). Determinar la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada del distrito de Pedro Ruiz Gallo.
- Silva, M. (2017). Extracción del mucílago de la penca de tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias. *Universidad nacional Mayor de San Marcos, Lima-Per.*
- SINIA (2016). Superficie de área verde urbana por habitante. MINAM. Recuperado de <http://sinia.minam.gob.pe/indicadores/superficie-area-verde-urbana-habitante>
- Soderberg, C. (2016). Guías de EPA para la reutilización de aguas residuales para la agricultura. *Perspectivas en Asuntos Ambientales*, 13–21.
- Vargas, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Tomo I. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, pág. 165-177, 183-190,197-198,227-228,282-286. Recuperado a partir de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Tratamient>

o+de+agua+para+consumo+humano+Plantas+de+filtraci?n+r?pida+Manual
+l+:+Teor?a+Tomo+l#0

Vazquez, O. (2007). Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales, pág. 104.

Vélez, M. V. (1999). Acuíferos costeros. Hidráulica de Aguas Subterráneas, 295–311.



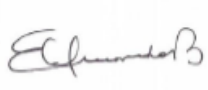

Villabona Ortiz A., Paz Astudillo, I. C., & García Martínez, J. (2013). Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural
Characterization of *Opuntia ficus-indica* for using as a natural coagulant. Rev. Colomb. Biotecnol., XV (1), 137-144.

World Health Organization (WHO). (2012). Inorganic Constituents and Aesthetic Parameters Session Objectives. New York.

Zerbatto, M., Carrera, E., Eliggi, M., Modini, L., Vaira, S., Nosedá, J., & Abramovich, B. (2009). Cloruro Férrico para la coagulación optimizada y remoción de enteroparásitos en agua. Augmdomus, 1, 18–26. Recuperado a partir de <http://www.revistas.unlp.edu.ar/domus/article/viewFile/73/40>

ANEXOS

Anexo 1. Informe del análisis de parámetros físicos, químicos y microbiológicos

| | | |
|--|---|--|
|  | NSF Envirolab LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION INACAL-DA CON REGISTRO N° LE-011 |  |
| INFORME FINAL | | |
| Dirección de Entrega: Jocelyn Torres Universidad Peruana Unión Car. Central Km. 19 Villa Unión, Ñaña Lurigancho, Lima Lima, Peru | | Solicitante: C0197488 Universidad Peruana Unión Car. Central Km. 19 Villa Unión, Ñaña Lurigancho, Lima Lima, Peru |
| Resultado | Completo | Fecha de Informe 2017-08-28 |
| Procedencia: Laguna La Mansión - Canal de Entrada de Riego | | |
| Producto: Agua | | |
| Tipo de Servicio: Análisis | | |
| Informe de Ensayo N° J-00267725 | | |
| Coordinador de Proyecto: Julio Manuel Zarate Vargas | | |
| Gracias por utilizar los servicios de NSF Envirolab. Por favor, póngase en contacto con el Coordinador de Proyecto, si desea información adicional o cualquier aclaración que pertenecen a este informe. | | |
| Informe Autorizado por  Enrique Quevedo Bacigalupo Jefe de Laboratorio | | Fecha de Emisión 2017-08-28  Quím. Joel Atamza Orejuela Supervisor de Físicoquímica C.Q.P. N°923 |
| Av. La Marina 3059 San Miguel - Lima 32 PERU Tel: (511) 616-5400 Fax: (511) 616-5418 Email: envirolab@nsf.org Web: www.envirolabperu.com.pe | | |
| F20170828171918 J-00267725 pág 1 de 4 El presente informe no podrá ser reproducido parcial o totalmente excepto con la aprobación por escrito de NSF Envirolab. Solamente los documentos originales son válidos y NSF Envirolab no se responsabiliza por la validez de las copias. Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto ni la autorización de uso de la Marca NSF. Los resultados se refieren únicamente a los elementos analizados, en la condición de muestra recibida por el laboratorio. | | |



Información General

Matriz: Agua
Solicitud de Análisis: Cotización N° 34728 (Ago-398)
Muestreado por: Cliente
Procedencia: Laguna La Mansión - Canal de Entrada de Riego
Referencia: Plantación de lúcuma, en la esquina, pared de cemento

Identificación de Laboratorio: S-0001406858
Tipo de Muestra: Agua Residual Doméstica
Identificación de Muestra: AR-01
Fecha de Recepción/Inicio de Análisis: 2017-08-16
Fecha y hora de Muestreo: 2017-08-15 20:30

| Análisis | Fecha de Fin de Análisis | Resultado | Unidad |
|--|--------------------------|------------|------------|
| Microbiología | | | |
| # Coliformes Termotolerantes (N). Agua. SMEWW-APHA-AWWA-WEF 9221 E.1. p. 9-74. 22nd Ed. 2012. Multiple - Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Fecal Coliform Procedures. Thermotolerant Coliform Test (EC Medium). | 2017-08-19 | | |
| 3-Coliformes Termotolerantes | | 7 900 000 | NMP/100 mL |
| # Coliformes Totales (N). Agua. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 9221 B. pp. 9-66-9-69. 22nd Ed. 2012. Multiple- Tube Fermentation Technique for Members of the coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique. | 2017-08-20 | | |
| 3-Coliformes Totales | | 33 000 000 | NMP/100 mL |

| | | | |
|--|------------|----------|-------|
| # Parásitos (huevos de helmintos)(N). NSF INASSA-LB-009. 4ta Edición. 2016 (Método Validado). DETECCIÓN Y/O ENUMERACION DE HUEVOS DE HELMINTOS EN AGUA | 2017-08-16 | | |
| Tremátoda - Fasciola Hepática | | N.D.(<1) | Org/L |
| Céstoda - Taenia sp. | | N.D.(<1) | Org/L |
| Céstoda - Hymenolepis sp. | | N.D.(<1) | Org/L |
| Céstoda - Diphylobotrium sp. | | N.D.(<1) | Org/L |
| Nemátoda - Ascaris sp. | | N.D.(<1) | Org/L |
| Nemátoda - Ancylostoma sp./Necator sp. | | N.D.(<1) | Org/L |
| Nemátoda - Trichuris sp. | | N.D.(<1) | Org/L |
| Nemátoda - Strongyloides sp. | | N.D.(<1) | Org/L |
| Nemátoda - Enterobius sp. | | N.D.(<1) | Org/L |
| Química | | | |
| * Sólidos Volátiles en Agua. SMEWW Part 2540-E, 22nd Ed 2012 | 2017-08-18 | | |
| Sólidos Volátiles | | 128 | mg/L |
| Aceites y Grasas en Agua. EPA Method 1664, Revisión B, 2010 | 2017-08-16 | | |
| Aceites y Grasas (1L) | | 10 | mg/L |
| Arsénico Total en Agua. EPA Method 200.7, Revised 4.4 May 1994 | 2017-08-18 | | |
| Arsénico Total | | 0,120 | mg/L |
| DBO5 en Aguas. EPA Method 405.1, Revised March 1983 | 2017-08-21 | | |
| DBO5 | | 110 | mg/L |
| DQO en Agua. EPA Method 410.1, Revised March 1983 | 2017-08-18 | | |

FI20170828171918

J-00267725

pág 2 de 4

El presente informe no podrá ser reproducido parcial o totalmente excepto con la aprobación por escrito de NSF Envirolab. Solamente los documentos originales son válidos y NSF Envirolab no se responsabiliza por la validez de las copias. Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto ni la autorización de uso de la Marca NSF. Los resultados se refieren únicamente a los elementos analizados, en la condición de muestra recibida por el laboratorio.

| Análisis | Fecha de Fin de Análisis | Resultado | Unidad |
|--|--------------------------|-----------|--------|
| Química (Continúa...) | | | |
| DQO | | 233 | mg/L |
| Fosfato en Agua. EPA Method 365.3, March 1983 | 2017-08-16 | | |
| Fosfato | | 0,862 | mg/L |
| N-Amoniacal en Agua. SMEWW Part 4500-NH3-F, 22nd Ed 2012 | 2017-08-17 | | |
| N - Amoniacal | | 2,54 | mg/L |
| N-Nitrato en Agua. EPA Method 352.1, Revised March 1983 | 2017-08-21 | | |
| N - Nitrato | | 0,21 | mg/L |
| Plomo Total en Agua. EPA Method 200.7, Revised 4.4 May 1994 | 2017-08-18 | | |
| Plomo Total | | 0,282 | mg/L |
| Sólidos Sedimentables. EPA Method 160.5, March 1983 | 2017-08-16 | | |
| Sólidos Sedimentables | | 6,7 | mL/L/h |
| Sólidos Totales en Agua. EPA 160.3, March 1983 | 2017-08-17 | | |
| Sólidos Totales | | 1 685 | mg/L |
| Sólidos Totales en Suspensión en Agua. SMEWW Part 2540-D, 22nd Ed 2012 | 2017-08-18 | | |
| Sólidos Totales en Suspensión | | 822 | mg/L |

Notas de Ensayo:

N.D.: Significa que el Resultado es No Detectable al nivel de cuantificación indicado en el paréntesis.



Ensayos realizados por:

| | Id | Dirección |
|-------------------------|------------|--|
| Ensayos realizados por: | NSF_LIMA_E | NSF Envirolab, Lima, Peru Avenida La Marina 3059 San Miguel Lima, Perú |

Referencias a los Procedimientos de Ensayo:

Referencia Técnica

| | |
|--------|---|
| IM0134 | #Coliformes Totales (N). Agua. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 9221 B. pp. 9-66-9-69. 22nd Ed. 2012. Multiple- Tube Fermentation Technique for Members of the coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique. |
| IM0135 | #Coliformes Termotolerantes (N). Agua. SMEWW-APHA-AWWA-WEF 9221 E.1. p. 9-74. 22nd Ed. 2012. Multiple – Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Fecal Coliform Procedures. Thermotolerant Coliform Test (EC Medium). |
| IM0141 | #Parásitos (huevos de helmintos)(N). NSF INASSA-LB-009. 4ta Edición. 2016 (Método Validado). DETECCION Y/O ENUMERACION DE HUEVOS DE HELMINTOS EN AGUA |
| IQ0264 | Aceites y Grasas en Agua. EPA Method 1664, Revisión B, 2010 |
| IQ0286 | DBO5 en Aguas. EPA Method 405.1, Revised March 1983 |
| IQ0287 | DQO en Agua. EPA Method 410.1, Revised March 1983 |
| IQ0297 | Fosfato en Agua. EPA Method 365.3, March 1983 |
| IQ0304 | N-Amóniacal en Agua. SMEWW Part 4500-NH3-F, 22nd Ed 2012 |
| IQ0305 | N-Nitrato en Agua. EPA Method 352.1, Revised March 1983 |
| IQ0316 | Sólidos Totales en Agua. EPA 160.3, March 1983 |
| IQ0318 | Sólidos Totales en Suspensión en Agua. SMEWW Part 2540-D, 22nd Ed 2012 |
| IQ0322 | * Sólidos Volátiles en Agua. SMEWW Part 2540-E, 22nd Ed 2012 |
| IQ0761 | Arsénico Total en Agua. EPA Method 200.7, Revised 4.4 May 1994 |
| IQ0782 | Plomo Total en Agua. EPA Method 200.7, Revised 4.4 May 1994 |

| | |
|--------|---|
| IQ1010 | Sólidos Sedimentables. EPA Method 160.5, March 1983 |
|--------|---|

Descripciones de ensayos precedidos por un "*" indican que los métodos no han sido acreditados por el INACAL-DA y la prueba se ha realizado según los requisitos de NSF. De no contar con el "*" indica los parámetros asociados a esta(s) muestra(s) se encuentran dentro del alcance de la acreditación.

Descripciones de ensayos precedidos por un "#" indican que los métodos han sido subcontratados.

Anexo 2. Análisis de caracterización de calidad de agua del canal de riego

Se llevó a cabo la caracterización de la calidad del agua por Análisis fisicoquímico y biológico del agua en laboratorio, los resultados se encuentran en el Anexo 6; y medición parámetros *in-situ* (Figura 25). En las figuras 26, 27, 28 y 29 se puede apreciar los parámetros de Coliformes Termotolerantes, Coliformes totales, aceites y grasas, DBO₅, plomo total y DQO, que superan los Estándares de Calidad Ambiental – agua, Clase III Agua para Riego de Vegetales y Bebida de Animales (Anexo 2).



Figura 51. Medición de parámetros de calidad de agua in-situ en el canal de riego

Comparación de Resultados Físico-Químicos : Aceites y Grasas & ECA 2017 - Categoría 3 - D1

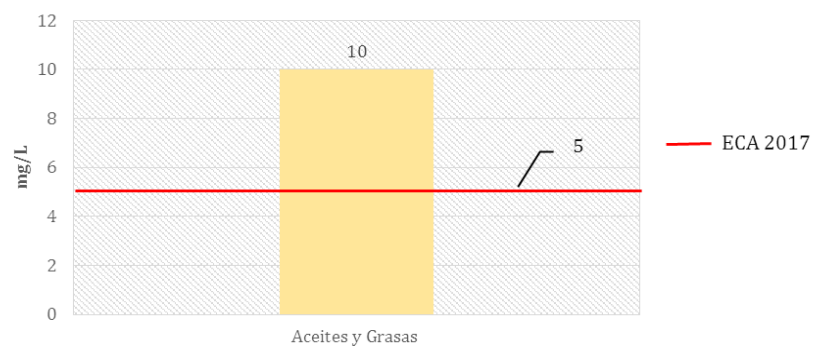


Figura 52. Resultados de aceites y grasas

Comparación de Resultados Físico-Químicos: DBO₅ & ECA 2017 - Categoría 3 - D1

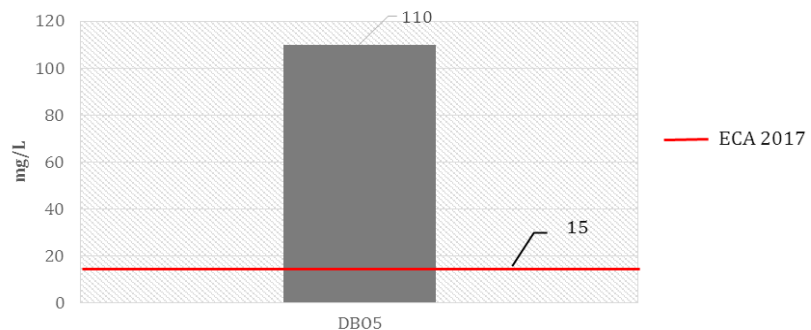


Figura 53. Resultados de DBO₅

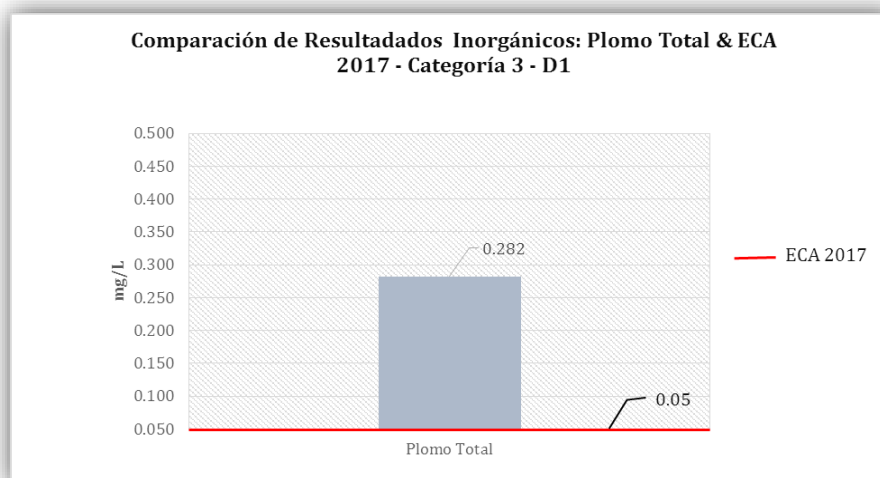


Figura 54. Resultados de plomo total

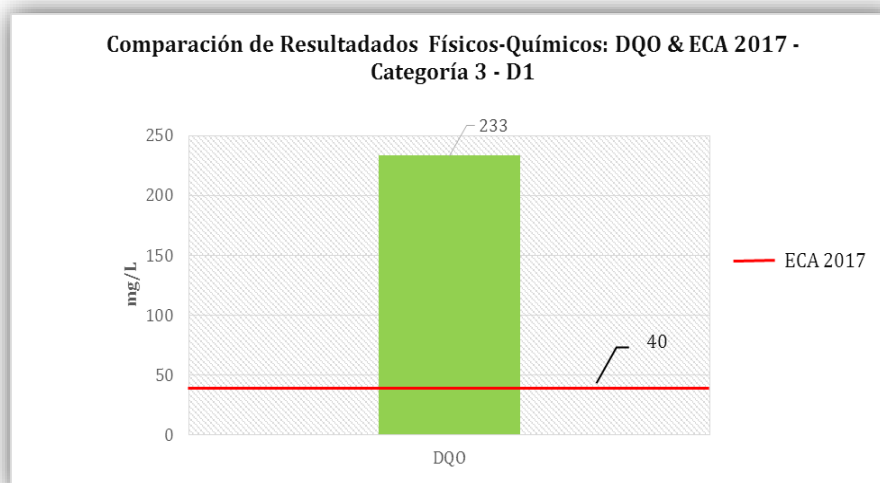


Figura 55. Resultados de DQO

Anexo 3. *Medición de caudal*

En base a la tarifa de agua con fines agrarios que la Universidad Peruana Unión paga a la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Rímac del Ministerio de Agricultura y riego, que asciende a 0.04618943 soles/m³ y un total al año de 11 673,00 soles, fue posible determinar que el consumo anual de agua para el riego de áreas verdes alcanza los 252 720 m³, lo cual es equivalente a un consumo de 702 m³/día.

La medición del caudal fue con el método de área – velocidad (DIGESA, 2007), con medidas del canal y velocidad del agua; y con el objetivo de establecer un horario de caudal y nivel de turbiedad crítica se establece el horario 7 am, 3 pm, y 10 pm durante tres días, los resultados del monitoreo están en la Tabla 26, siendo que, el día 3 a horas de 10:00 pm el ingreso del agua para abastecer a la Laguna y establecido para el muestreo de diagnóstico de parámetros de calidad de agua.

Tabla 33

Resultados de monitoreo de caudal, turbiedad y pH, en el ingreso de agua del canal de regadío

| Horario | | Caudal * (m ³ /min) | Turbiedad** (UNT) | pH*** (Unid. de pH) |
|---------|---------|-----------------------------------|----------------------|---------------------|
| Día 1: | | | | |
| Mañana | 7:00 am | 0.32 | 185 UNT | 7.3 |
| Tarde | 3:00 pm | 0.25 | 146 UNT | 7.1 |
| Noche | 10:00pm | 0.36 | 280 UNT | 7.3 |

| Día 2: | | | | |
|--------|---------|------|----------|-----|
| Mañana | 7:00 am | 0.11 | 75 UNT | 7.2 |
| Tarde | 3:00 pm | 0.22 | 89.6 UNT | 7.1 |
| Noche | 10:00pm | 0.14 | 60 UNT | |

| Día 3: | | | | |
|--------|---------|-------|----------|-----|
| Mañana | 7:00 am | 0.21 | 95 UNT | 7.3 |
| Tarde | 3:00 pm | 0.25 | 82.3 UNT | 7.5 |
| Noche | 10:00pm | 0.487 | 410 UNT | 7.3 |

*Método de medición de caudal por área, tiempo y velocidad (DIGESA, 2007)

** Medición con equipo Turbidímetro

*** Medición con equipo pH-metro

Anexo 4. *Población universitaria*

En la Universidad Peruana Unión se cuenta con recursos valiosos que mediante un uso racional y sostenible podrían mejorar calidad de vida de la comunidad. El recurso natural más predominante y provechoso es la napa freática y esta a su vez es la causa de sus abundantes áreas verdes. Por otro lado, se han detectado algunas deficiencias en servicios de agua y desagüe, ya que no existe orden ni planificación específica de éstos servicios, el tamaño no previsto de las cisternas y falta de tratamiento del agua para uso de riego de áreas verdes. La universidad cuenta con principios de vida saludable fuertes y de integración con la naturaleza que provienen directamente de la cosmovisión adventista, por ello cada obra realizada en el campus debe preservar estos principios. Según el análisis realizado en el Plan de ordenamiento de infraestructura del campus de la UpeU, se ha podido notar que se genera aglomeración de personas, debido a que existen muchas áreas compartidas en un solo edificio reduciendo espacios comunes como las áreas verdes, provocando así una contaminación visual y auditiva, problemática que corresponde la inexistencia de una planificación ordenada y se observa equipamientos desordenados en el campus con un desarrollo irresponsable (UPeU, 2016).

Podríamos establecer, por tanto, de acuerdo a las directrices marcadas por la OMS el nivel mínimo deseable para este indicador igual a 10 metros cuadrados de zona verde por habitante para el conjunto de ciudades mediterráneas que participan en este proyecto.

No obstante, es conveniente señalar la importancia de la proximidad y accesibilidad, ya que esta característica es incluso más importante que la cantidad total de superficie verde. En el caso de las ciudades españolas, la actual Ley del Suelo (año 2008) no expresa un mínimo exigible de metros cuadrados de zona verde.

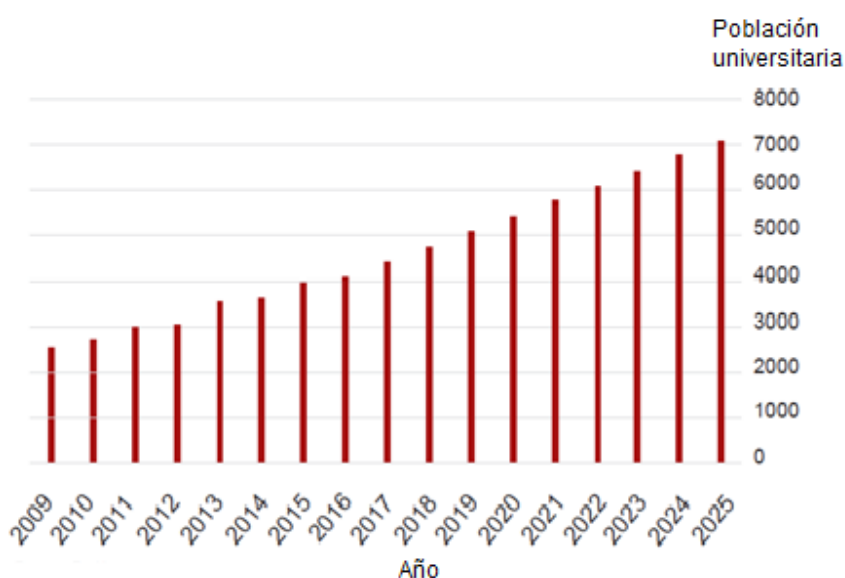


Figura 56. Proyección de población universitaria UPeU del año 2009 al 2025

Anexo 5. Áreas verdes del campus UPeU



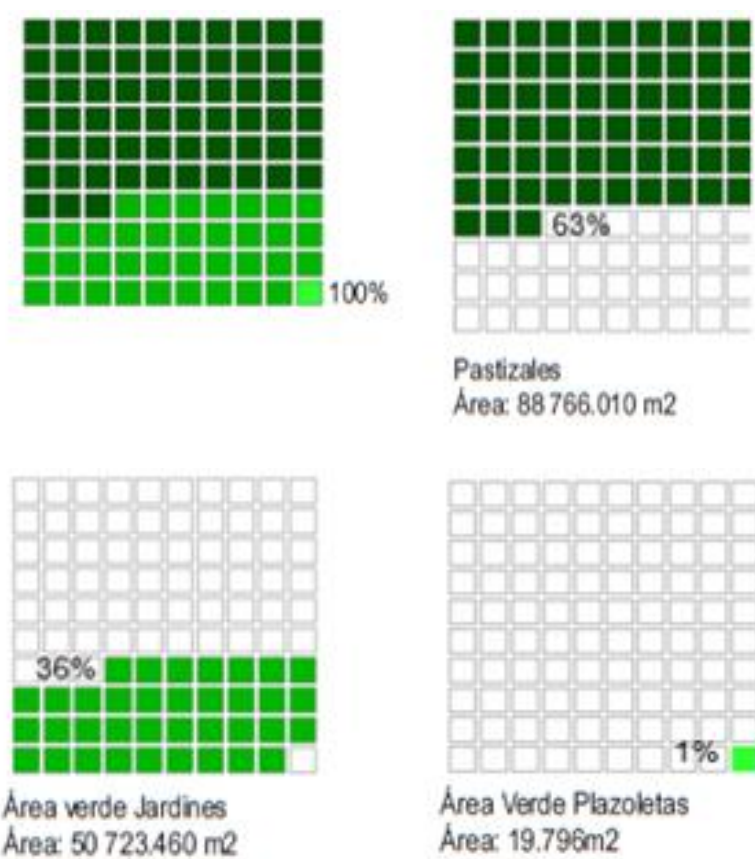
L.17: Mapa de áreas verdes de la UPeU.
Fuente: Deza Pamela - 2016.

Fuente: (UPeU, 2016).

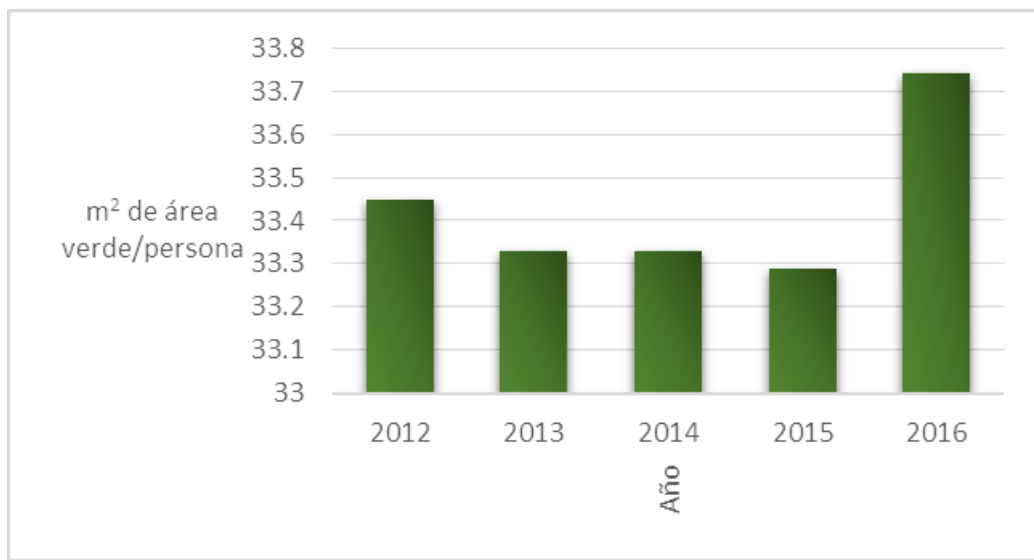


Fuente: (UPeU, 2016).

Anexo 6. *Proporción de acuerdo al uso de áreas verdes*



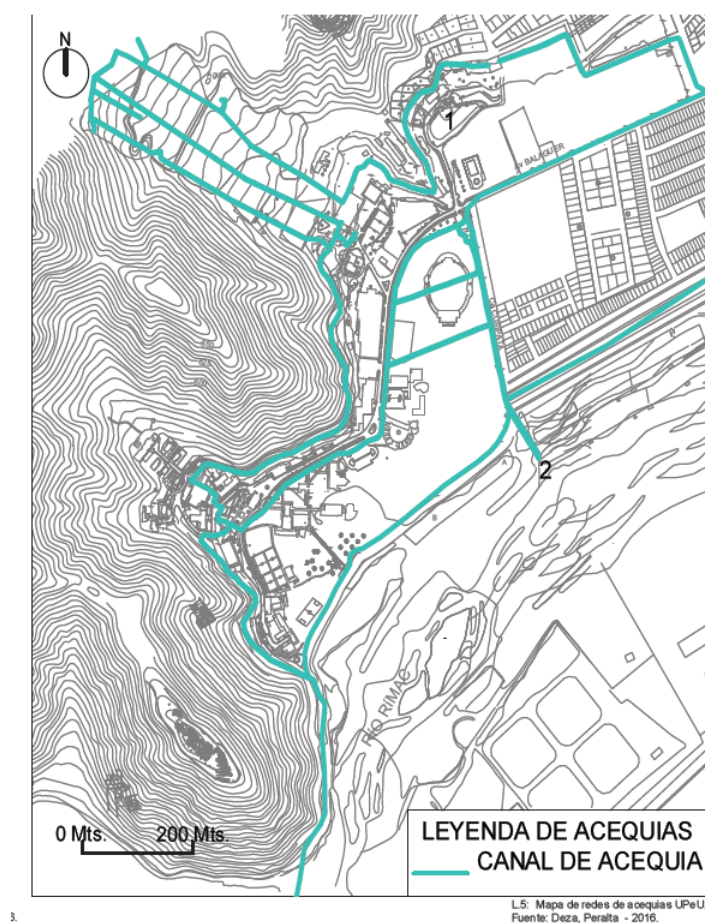
Anexo 7. Áreas verdes por persona en el campus universitario año 2012-2016




| Año | Área (m²) | m² de área verde/persona |
|------|------------|--------------------------|
| 2012 | 200707.679 | 33.45 |
| 2013 | 199983.355 | 33.33 |
| 2014 | 199983.355 | 33.33 |
| 2015 | 199712.03 | 33.29 |
| 2016 | 202434.34 | 33.74 |

Anexo 8. Fuente de riego de áreas verdes a través de canales

La fuente de agua para el riego de áreas verdes es a través del canal de riego agrícola de la zona de Carapongo, el que se distribuye a lo largo del campus por diferentes acequias como se muestra en el plano siguiente, y se almacena en la Laguna “La Mansión” que tiene un área total de 3 499 m², 278.86 m de perímetro, 6 405.336 m³ de volumen de almacenamiento, 0.12 m³/s de caudal de ingreso una vez por semana.



Anexo 9. Ficha técnica de Cloruro férrico

| | | |
|---|---|--|
|  | FICHA DE SEGURIDAD Nº 111 COLORURO FERRICO 40% | Revisión: 1-12-2010 Nº revisión: 4 Página: 1 de 14 |
|---|---|--|

1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DE LA EMPRESA

1.1 Identificadores del producto

| | |
|------------------------|----------------------------|
| - Nombre del producto: | COLORURO FÉRICO 40% |
| - Nombre químico: | Tricloruro de hierro |
| - Fórmula molecular: | FeCl ₃ |
| - Tipo de producto: | Sustancia |

1.2 Usos identificados / Usos desaconsejados

| | |
|-----------------------|---|
| - Usos identificados: | - Tratamiento de agua potable y agua de aporte industrial - Tratamiento de aguas residuales - Fabricación de formulados - Tratamiento de fangos - Tratamiento de biogás - Tratamiento de residuos - Uso como reactivo o precursor en fabricación de otros productos químicos - Tratamiento de superficies – grabados - Uso en laboratorio |
|-----------------------|---|

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

ACIDEKA, S.A.
 CAPUCHINOS DE BASURTO 6 – 4ª PLANTA
 48013 BILBAO (VIZCAYA)
 Tfno: 944 255 022
 e-mail: acideka@acideka.com

1.4. Teléfono de emergencia: **944 255 022** *(Disponible sólo en horas de oficina)*

2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

2.1. Clasificación de la sustancia

Clasificación según reglamento europeo (CE) 1272/2008, y sus modificaciones
 Producto clasificado como peligroso.

| Clase de peligro | Categoría de peligro | Indicaciones de Peligro |
|--|----------------------|-------------------------|
| Toxicidad aguda | Categoría 4 | H302 |
| Corrosión/irritación cutánea | Categoría 2 | H315 |
| Sensibilización cutánea | Categoría 1 | H317 |
| Lesiones oculares graves o irritación ocular | Categoría 1 | H318 |
| Corrosivo para metales | Categoría 1 | H290 |



Clasificación según directiva europea 67/548/CEE o 1999/45/CE y sus modificaciones
 Producto clasificado como peligroso.

| Clase de peligro/categoría de peligro | Frases R |
|---------------------------------------|--|
| Xn - Nocivo | R22: Nocivo por ingestión R38: Irrita la piel R41: Riesgo de lesiones oculares graves R43: Posibilidad de sensibilización en contacto con la piel |

2.2. Elementos de la etiqueta

Etiqueta CE – De acuerdo con el reglamento europeo (CE) 1272/2008 y sus modificaciones.

Pictogramas de peligro:



ACIDEKA

FICHA DE SEGURIDAD Nº 111

CLORURO FERRICO 40%

Revisión: 1-12-2010

Nº revisión: 4

Página: 2 de 14

Palabra de advertencia:

Peligro

Indicaciones de peligro:

- H290 - Puede ser corrosivo para los metales.
- H302 - Nocivo en caso de ingestión.
- H315 - Provoca irritación cutánea.
- H317 - Puede provocar una reacción alérgica en la piel.
- H318 - Provoca lesiones oculares graves.

Consejos de prudencia:

Prevención

- P234 - Conservar únicamente en el recipiente original.
- P261 - Evitar respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/ el aerosol.
- P264 - *Lavarse...condenzadamente tras la manipulación.*
- P270 - No comer, beber ni fumar durante su utilización.
- P272 - Las prendas de trabajo contaminadas no podrán sacarse del lugar de trabajo.
- P280 - *Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.*

Respuesta

- P301+P312 - *EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico en caso de malestar.*
- P302+P352 - *EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.*
- P305+P351+P338 - *EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Adorar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.*
- P310 - Llamar inmediatamente a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico.
- P321 - Se necesita un tratamiento específico. Ver... en esta etiqueta.
- P330 - Enjuagarse la boca.
- P332+P313 - En caso de irritación cutánea: Consultar a un médico.
- P333+P313 - En caso de irritación o erupción cutánea: Consultar a un médico.
- P362 - *Quitarse las prendas contaminadas y lavarlas antes de volver a usarlas.*
- P363 - Lavar las prendas contaminadas antes de volver a usarlas.
- P390 - *Absorber el vertido para que no dañe otros materiales.*

Almacenamiento

- P406 - Almacenar en un recipiente resistente a la corrosión/... con revestimiento interior resistente.

Eliminación

- P501 - Eliminar el contenido/el recipiente según legislación vigente.

NOTA: en la etiqueta que acompaña al producto sólo figuran los consejos de prudencia marcados en cursiva.

2.3. Otros peligros

- Información no disponible.

3. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

| Nombre de la sustancia | Concentración | Nº CE | Nº CAS | Nº de registro REACH | Nº índice en Anexo VI Reglamento CE 1272/2008 |
|------------------------|---------------|-----------|-----------|----------------------|---|
| Cloruro férrico | 39-42% | 231-729-4 | 7705-08-0 | 01-211949798-05-0005 | --- |

4. PRIMEROS AUXILIOS.

4.1. Descripción de los primeros auxilios

4.1.1 En caso de inhalación

- Respirar aire fresco.
- Enjuagar con agua boca y nariz.
- Si los síntomas persisten, llamar a un médico.



ACIDEKA

FICHA DE SEGURIDAD N° 111

COLORURO FERRICO 40%

Revisión: 1-12-2010
N° revisión: 4
Página: 3 de 14

4.1.2 En caso de contacto con los ojos

- Lavar inmediatamente con abundante agua templada durante varios minutos. Lavar también debajo de los párpados.
- Consultar a un médico.

4.1.3 En caso de contacto con la piel

- Lavar con abundante agua y jabón.
- Quitar y lavar la ropa contaminada antes de usarla de nuevo.
- Si los síntomas persisten, llamar a un médico.

4.1.4 En caso de ingestión

- Llamar a un médico inmediatamente.
- NO inducir al vómito.
- Enjuagar la boca con agua.
- Beber 1 o 2 vasos de agua o leche.
- No dar nunca de beber a una persona que este inconsciente.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

4.2.1 En caso de inhalación

- Irritación del tracto respiratorio.

4.2.2 En caso de contacto con los ojos

- Irritación ocular.

4.2.3 En caso de contacto con la piel

- Irritación cutánea

4.2.4 En caso de ingestión

- Vómitos, diarrea, aletargamiento, dolor abdominal superior. En casos más graves, cianosis, shock y coma.

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deben dispensarse inmediatamente

- *Tratamiento de emergencia en caso de ingestión:* Administrar 1 ml/kg de peso corporal de una solución estándar (mEq/ml) de bicarbonato sódico después del lavado de estómago. Antiácidos convencionales también pueden ser también una alternativa segura.
- En caso de ingestiones importantes, 5-10 g de deferroxamina puede ayudar al final del lavado de estómago. (Medical Toxicology - Diagnosis and Treatment of Human Poisoning, Elsevier Science Publishing Co. Inc. New York, NY 1988.)

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

5.1 Medios de extinción

5.1.1 Medios de extinción apropiados

- Usar medios de extinción apropiados a la situación particular y entorno.

5.1.2 Agentes de extinción inadecuados

- Ninguno

5.2 Riesgos específicos derivados de la sustancia

- Por encima de la temperatura de descomposición del producto (285°C), se puede liberar cloruro de hidrógeno.

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

- Utilizar equipo de respiración autónomo.
- Llevar equipos de protección personal resistentes al fuego.

6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia



ACIDEKA

FICHA DE SEGURIDAD Nº 111

COLORURO FERRICO 40%

Revisión: 1-12-2010

Nº revisión: 4

1 Página: 4 de 14

6.1.1 Para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia

- Evitar el contacto con la sustancia.

6.1.2 Para el personal de emergencia

- Seguir las recomendaciones de la sección 7 (manipulación y almacenamiento).
- Llevar botas y buzo de protección.
- Si se forma aerosol o niebla de producto, utilizar media máscara de protección con filtro B/P2.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

- En caso de vertido confinado, intentar recuperar y reutilizar el producto. Si esto no fuera posible, absorber con tierra ó arena y someter el absorbente a posterior tratamiento.
- Cubrir los desagües y sumideros para evitar que el producto afecte a suelos o aguas.
- Si el producto contamina un río o un lago o se escapa por algún sumidero, informar a las autoridades.
- Evitar la extensión del derrame por medio de materiales absorbentes apropiados tales como arena o grava.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

- Recoger los derrames importantes utilizando una bomba apropiada.
- Limpiar el residuo que quede con agua y neutralizar el agua de lavado con un producto básico (sosa, cal, carbonato sódico, etc.)
- Los residuos deben ser gestionados de acuerdo con la legislación aplicable.

6.4 Referencia a otras secciones

- Consultar las medidas de protección en las listas de las secciones 7 y 8.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

7.1 Precauciones para una manipulación segura

- El lugar y métodos de trabajo deberá estar organizado de forma que se evite o minimice el contacto directo con el producto.
- Llevar guantes de protección de un material apropiado tal como PVC, neopreno o goma natural.
- Respetar las instrucciones del fabricante de los guantes en cuanto a permeabilidad y resistencia. Tener así mismo en cuenta las condiciones específicas del puesto de trabajo en las que el producto se utiliza, tales como el riesgo de cortes, abrasión y tiempo de contacto.
- Llevar gafas de seguridad, preferentemente tipo cerradas.

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Recomendaciones generales

- Mantener lejos de productos incompatibles, tales como productos alcalinos.
- Evitar la congelación de producto.
- Evitar altas temperaturas.

Materiales adecuados para su almacenamiento

- Plástico (PE, PP, PVC).
- Poliéster reforzado con fibra de vidrio.
- Cemento revestido de resina epoxi.
- Titanio.
- Acero resistente a los ácidos o acero ebonitado.

Materiales no adecuados para su almacenamiento

- Materiales no resistentes a los ácidos tales como aluminio, cobre, hierro,...
- Acero.
- Recipientes galvanizados.

7.3 Usos específicos finales

- Ver anexo.



FICHA DE SEGURIDAD N° 111

CLORURO FERRICO 40%

Revisión: 1-12-2010

N° revisión: 4

Página: 5 de 14

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN INDIVIDUAL

8.1. Parámetros de control

- VLA-ED 1 mg/m³ (expresado como Fe).
- DN(M)EL Trabajadores (8 horas/día de exposición)
 - DN(M)EL piel: 0,57 mg Fe/kg de peso corporal/día
 - DN(M)EL inhalación: 2,01 mg Fe/m³
- DN(M)EL Consumidores
 - DN(M)EL piel: 0,29 mg Fe/kg de peso corporal/día
 - DN(M)EL inhalación: 0,5 mg Fe/m³
 - DN(M)EL oral: 0,29 mg Fe/kg de peso corporal/día

8.2. Controles de la exposición

8.2.1 Controles técnicos apropiados

- Dotar a las instalaciones de lavajos y duchas de emergencia.
- Proveer de ventilación suficiente en las áreas de trabajo.

8.2.2 Medidas de protección individual, tales como equipos de protección personal

Protección de los ojos/la cara

- Llevar gafas de seguridad, preferentemente tipo cerradas.

Protección de la piel (manos y otros)

- Llevar guantes de protección de un material apropiado tal como PVC, neopreno o goma natural.
- Llevar ropa de trabajo.

Protección respiratoria.

- Medir máscara tipo B-P2 en caso de presencia de aerosol o niebla de producto.

Peligros térmicos

- Información no disponible.

Medidas de Higiene

- Asegúrese que las estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad están localizadas cerca del sitio de trabajo.
- Sustituir inmediatamente la ropa contaminada.
- Lavar cara y manos antes de los descansos y al término de la jornada laboral.

8.2.3 Controles de exposición medioambiental.

- *Medidas organizativas:* procedimientos operativos y de control para minimizar emisiones, especialmente durante operaciones de limpieza y mantenimiento.
- *Medidas preventivas relacionadas con los efluentes líquidos:* Los efluentes de cloruro férrico deben ser reutilizados o descargados al efluente industrial con posterior neutralización.
- *Medidas preventivas relacionadas con las emisiones al aire:* no se prevé las emisiones al aire debido a su baja presión de vapor.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

| | |
|---|-------------------------|
| Aspecto | Líquido rojizo - marrón |
| Olor | Prácticamente inodoro |
| Umbral olfativo | Dato no disponible |
| pH | < 1 |
| Punto de fusión/punto de congelación | - 12°C |
| Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición | 106-120°C |

| | |
|--|--|
| Punto de inflamación | No aplicable (sustancia inorgánica sin presencia de carbono o hidrógeno) |
| Tasa de evaporación | Dato no disponible |
| Inflamabilidad (sólido, gas) | No aplicable (sustancia inorgánica sin presencia de carbono o hidrógeno) |
| Límite superior/inferior de inflamabilidad o de explosividad | No aplicable (sustancia inorgánica sin presencia de carbono o hidrógeno) |
| Presión de vapor | Dato no disponible |
| Densidad de vapor | No aplicable |
| Densidad relativa | 1,42 |
| Solubilidad (es) | Soluble en agua en todas proporciones |
| Coefficiente de reparto n-octanol/agua | No aplicable (sustancia inorgánica) |
| Temperatura de auto-inflamación | No aplicable (sustancia inorgánica sin presencia de carbono o hidrógeno) |
| Temperatura de descomposición | 285°C |
| Viscosidad | 17 cps |
| Propiedades explosivas | No aplicable (sustancia inorgánica sin presencia de grupos funcionales asociados a propiedades explosivas) |
| Propiedades comburentes | No aplicable (sustancia inorgánica sin presencia de oxígeno) |

9.2. Información adicional

- En el contexto de riesgos físico-químicos, las sales de hierro no presentan propiedades oxidantes.

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

10.1. Reactividad

- Dado el bajo pH del producto se evitará el contacto con aquellos productos que son incompatibles con productos ácidos (Ej. hipoclorito sódico).
- Al contacto con ciertos metales desprende hidrógeno (gas inflamable y explosivo).

10.2. Estabilidad química

- El producto es estable en las condiciones de almacenamiento recomendadas.

10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas

- No se conocen reacciones peligrosas.

10.4. Condiciones que deben evitarse

- No hay información disponible.

10.5. Materiales incompatibles

- Ver sección 7 de esta ficha de seguridad (manipulación y almacenamiento).

10.6. Productos de descomposición peligrosos

- Ninguno.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

11.1. Toxicidad aguda

- LD50 oral: 1300 mg Cl_3Fe /kg de peso corporal.
- LD50 dérmica: 2000 mg Cl_3Fe /kg de peso corporal.

Toxicidad crónica

- NOAEL oral (ratas): 277 mg/kg de peso corporal y día.

11.2. Corrosión o irritación cutáneas

- Causa irritación cutánea categoría 2.



FICHA DE SEGURIDAD N° 111

CLORURO FÉRICO 40%

Revisión: 1-12-2010
N° revisión: 4
Página: 7 de 14

11.3. Lesiones o irritación ocular graves

- Irritación ocular, categoría 1. Provoca lesiones oculares graves.

11.4. Sensibilización respiratoria o cutánea

- Podría causar sensibilización cutánea.
- Se están realizando ensayos para determinar si el cloruro férrico puede dar lugar a reacciones de sensibilización cutánea.

11.5. Mutagenicidad en células germinales

- *Ensayo de mutación genética en bacteria y en células de mamífero*: "Genotoxicity of iron compounds in Salmonella typhimurium and L5178Y mouse lymphoma cells". Resultado: negativo en ambos casos.
- *Ensayo de genotoxicidad*: "Nuclear aberrations and micronuclei induction in the digestive tract of mice treated with different iron salts". Resultado: negativo.

11.6. Carcinogenicidad

- Ensayos realizados muestran que el cloruro férrico no es carcinogénico.

11.7. Toxicidad para la reproducción

- Resultados recientes de estudios llevados a cabo con cloruro ferroso y sulfato ferrosos han dado valores de NOAEL para efectos sobre la reproducción y el desarrollo de ≥ 500 mg/kg peso corporal/día y ≥ 1000 mg/kg peso corporal/día respectivamente.
- Estos resultados se consideran aplicables a las sales de hierro III tales como cloruro férrico, puesto que el hierro II ingerido es oxidado a hierro III por el organismo antes de ser absorbido.
- Suplementos de hierro de 5,8 a 11,7 mg/kg peso corporal/día (para individuos de 60kg) son prescritos de forma rutinaria a embarazadas, sin evidencia de efectos adversos de ningún tipo.

11.8. Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única

- No hay información disponible.

11.9. Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida

- NOAEL de 277 y 314 mg Fe/kg peso corporal/día (ratas macho y hembra respectivamente)

11.10. Peligro de aspiración

- Ver sección 11.1.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

12.1. Toxicidad

- PNEC agua: no aplicable.
- PNEC sedimento (g Fe/kg sedimento seco): 49,5
- PNEC suelo (g Fe/kg suelo seco): 55
- PNEC planta de tratamiento de aguas residuales (mg Fe/l): 500
- PNEC oral: no aplicable (no es bioacumulable)
- Peces (*Lepomis macrochirus*) 96 h: LC50: 20 mg Fe/l
- Invertebrados acuáticos (*Daphnia magna*) 48 h: EC50: 9.6 mg Fe/l

12.2. Persistencia y degradabilidad

- La biodegradabilidad no es aplicable a sales inorgánicas de metales. La precipitación y factores abióticos controlan la transformación y degradación del cloruro férrico en el medio ambiente.
- No obstante el hierro está sujeto a cierta actividad biológica puesto que hay bacterias que realizan procesos de transformación del hierro.

12.3. Potencial de bioacumulación

- En ensayos realizados han mostrado un factor de bioconcentración de < 20 .
- El hierro es un elemento traza esencial para los organismos (microorganismos, plantas y animales) y juega un importante papel en procesos biológicos. La incorporación de hierro en las células está controlada por procesos homeostáticos.

12.4. Movilidad en el suelo

- En función del pH, el hierro disuelto precipita rápidamente por lo que su impacto en el medio se reduce de forma importante.



FICHA DE SEGURIDAD N° 111

CLORURO FERRICO 40%

Revisión: 1-12-2010

N° revisión: 4

Página: 8 de 14

12.5. Resultados de la valoración PBT y mPmB

- El cloruro férrico no es sustancia PBT o mPmB.

12.6. Otros efectos adversos

- No hay información disponible.

13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN.

13.1. Métodos para el tratamiento de residuos

- Agua contaminada con cloruro férrico es fácilmente tratada ajustando el pH hasta 8. El hierro precipitará como hidróxido de hierro, mientras que los cloruros permanecen en solución.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

| | | ADR |
|-------|--|-----------------------------|
| 14.1. | N° ONU | 2582 |
| 14.2. | Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas | Cloruro Férrico en solución |
| 14.3. | Clase(s) de peligro para el transporte | 8 |
| | Etiqueta de peligro | 8 - Corrosivo |
| | Identificación de peligro | 80 |
| 14.4. | Grupo de embalaje | III |

14.5. Peligros para el medio ambiente

- No está clasificado como peligroso para el medio ambiente de acuerdo con los criterios establecidos en el ADR.

14.6. Precauciones particulares para los usuarios

- Información no disponible.

14.7. Transporte a granel con arreglo al anexo II del Convenio Marpol 73/78 y del Código IBC

- No aplicable.

15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA.

15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específica para la sustancia o la mezcla

- Reglamento (CE) n° 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2006, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH), y sus enmiendas, en particular, reglamento (CE) 453/2010.
- Directiva 67/548/CEE del Consejo, de 27 de junio de 1967, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, embalaje y etiquetado de las sustancias peligrosas, y sus enmiendas.
- Reglamento (CE) n° 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas, y sus enmiendas.
- Directiva 98/24/CE del Consejo de 7 de abril de 1998 relativa a la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo, y sus enmiendas.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos.
- Ley 31/1995, de 8/11 de Prevención de Riesgos Laborales - Valores Límites Ambientales (VLAs), Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo)- y sus enmiendas.

15.2. Evaluación de la seguridad química

- De acuerdo con el reglamento REACH, se ha realizado la evaluación de la seguridad química de esta sustancia.

Fuente. (ACIDEKA, 2010)

Anexo 10. *Procedimiento para la extracción de mucílago de la Opuntia ficus-indica*



Limpieza y corte de los cladodios



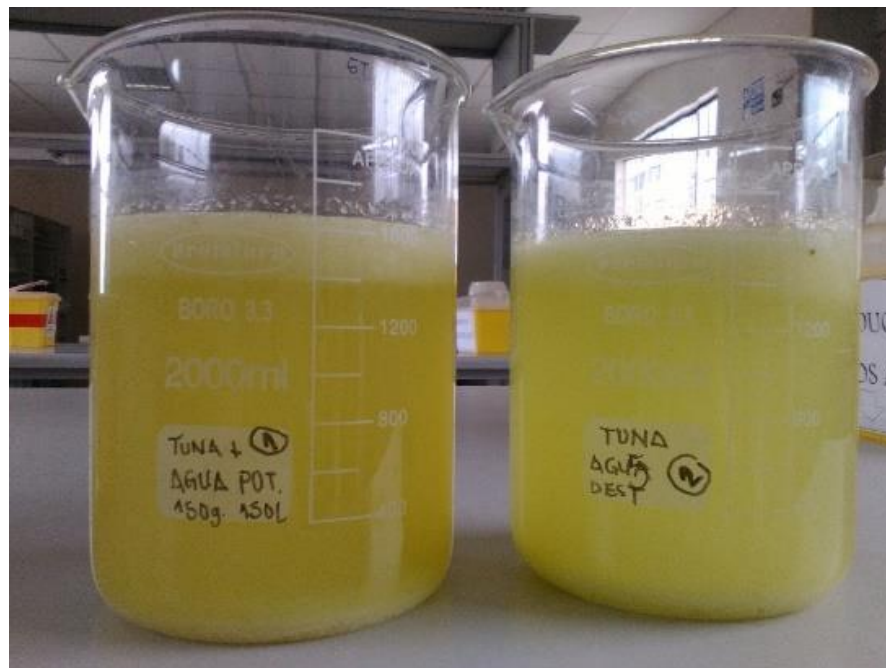
Proceso de trituración



Proceso de macerado



Procedo de maceracion



Proceso de dilución

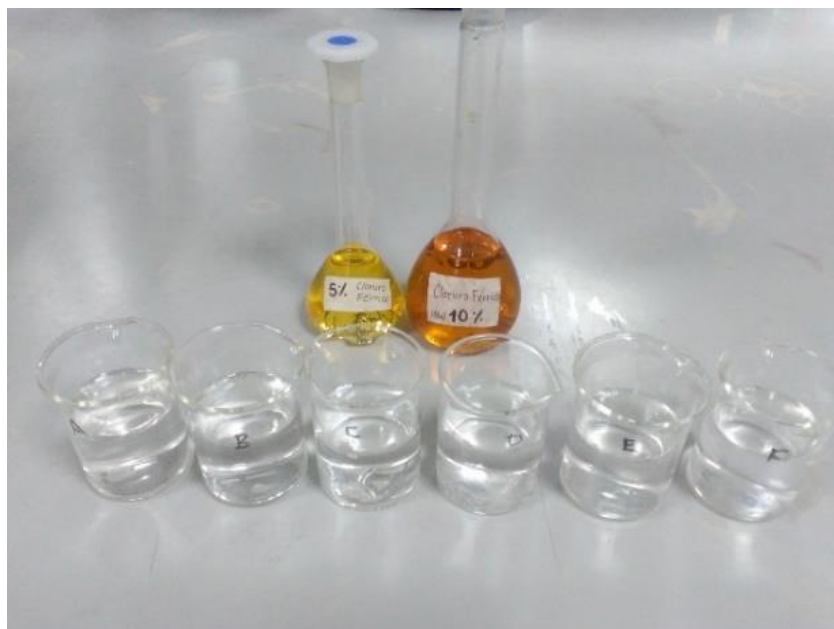


Proceso de licuado para llevar a estufa



Mucílago de *Opuntia ficus-indica* en polvo

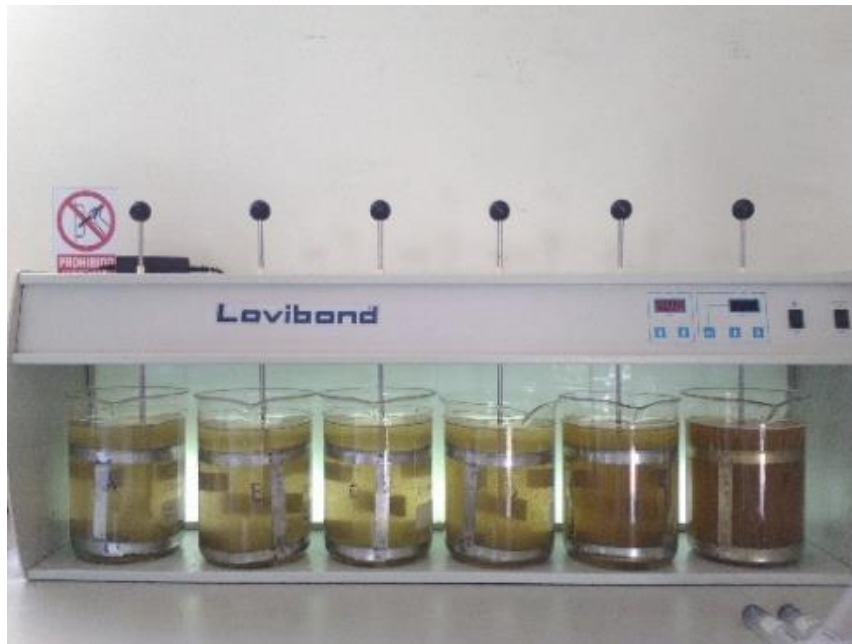
Anexo 11. Procedimiento de tratabilidad con la Prueba de Jarras



Preparacion de dosificaciones de cloruro férrico



Preparacion de dosificaciones de coagulante de mucílago de Opuntia ficu-indica



Proceso de agitación con la Prueba de jarras



Inicio de la floculación



Formación de flocs en la coagulación



Periodo de decantación



Equipo de trabajo



Clarificación del agua



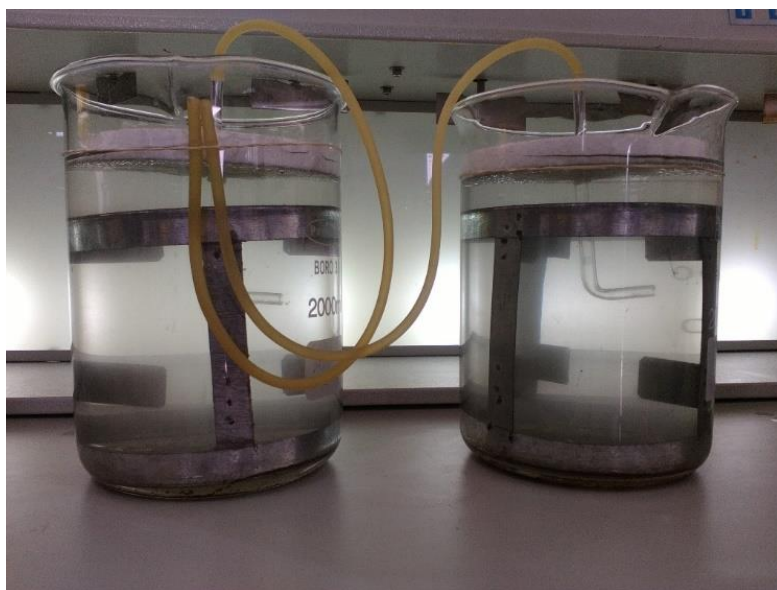
Fase 1 con coagulante químico



Fase 2 con coagulante químico



Fase 3 con coagulante químico



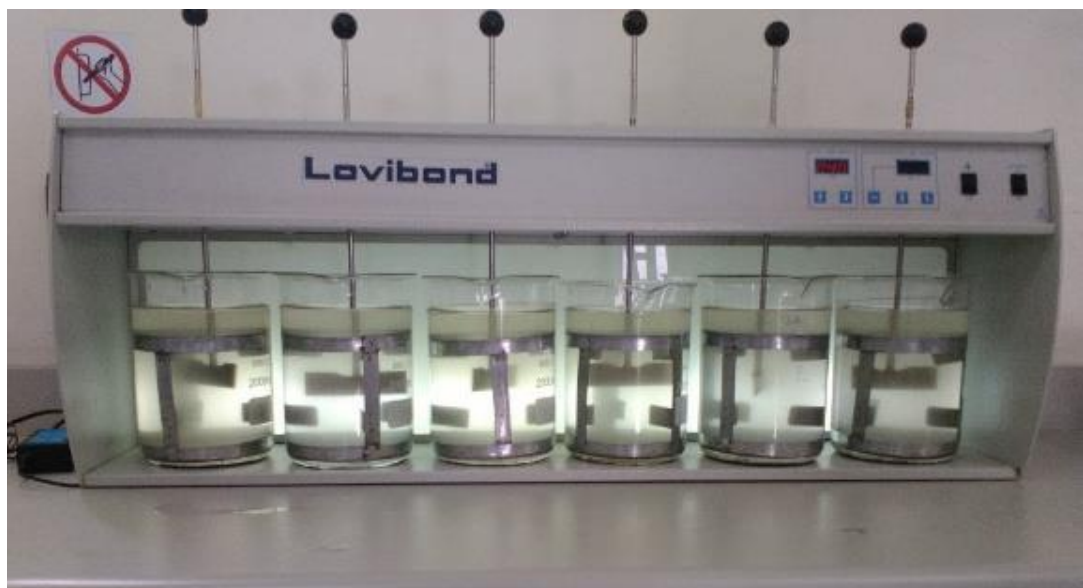
Procedimiento paa la toma de muestra de agua tratada



Equipo de trabajo



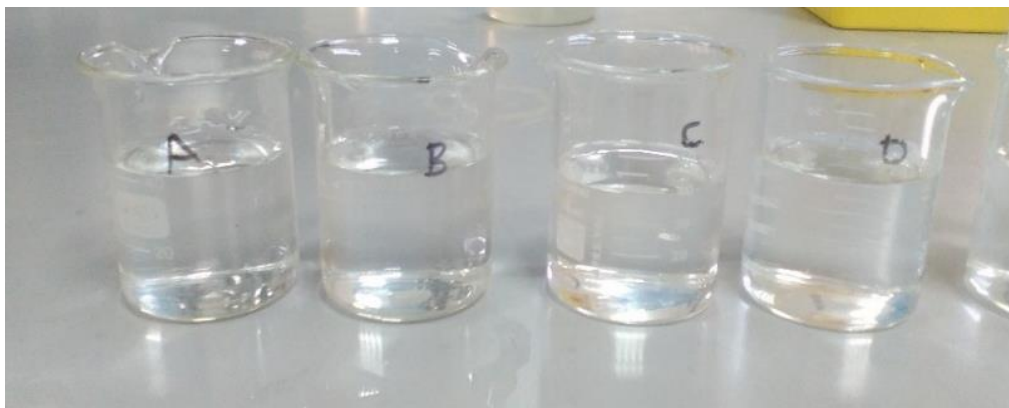
Fase 1 con coagulante natural



Fase 2 con coagulante natural



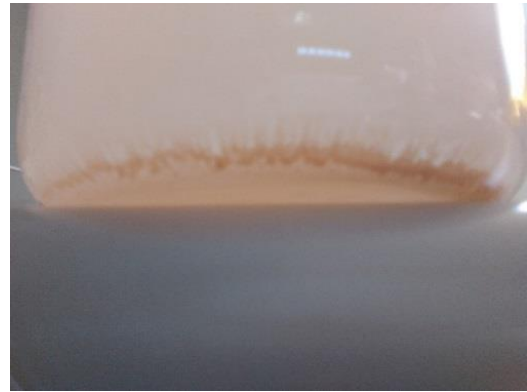
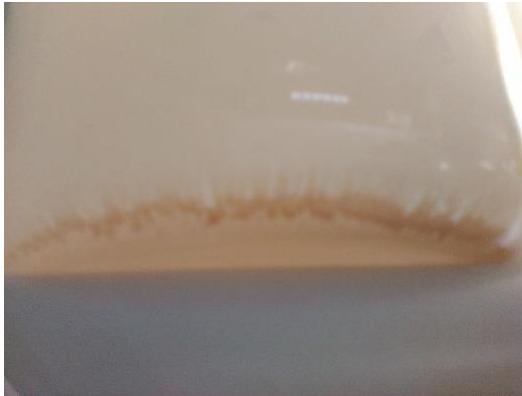
Procedimiento de toma de muestra



Muestra de agua tratada para la medición de turbiedad residual



Diferencia de turbiedad inicial y final del agua

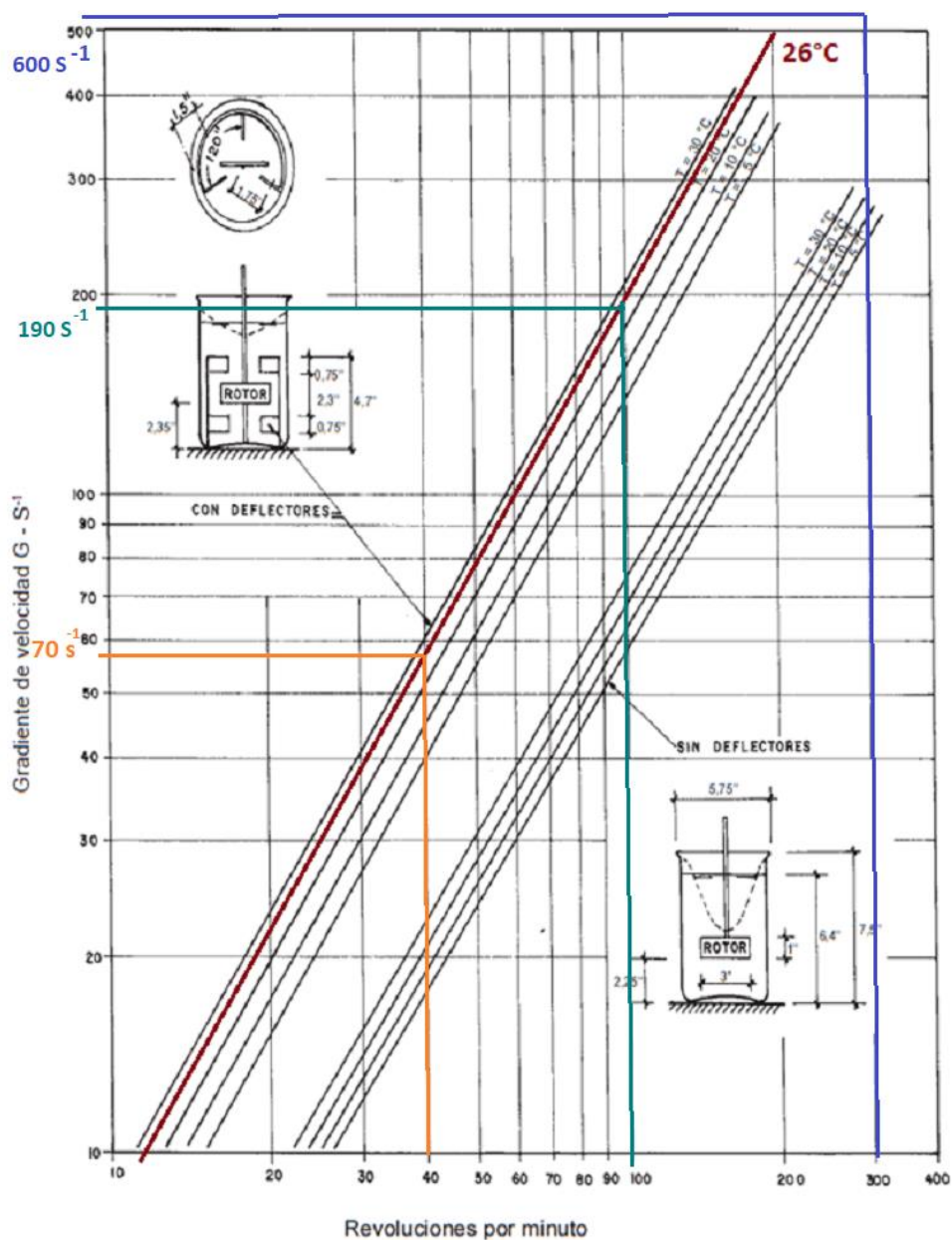


Tipo de sedimentamentación por caída libre sin intervencion de coagulación



**Presencia de flocs indicador de tratamiento químico de coagulación-
floculación**

Anexo 12. Gráfico que relaciona la gradiente de velocidad y las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con deflectores, tipo de rotor y vaso precipitado de 2 litros de tipo de componente circular.



Anexo 13. Base de datos de las pruebas de Jarras en laboratorio

| MUCILAGO EN POLVO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|--------------------|----------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|------|
| DOSIS | | mg/L | PRUEBA 1 | | | | | | REPÚBLICA 1 | | | | | | REPÚBLICA 2 | | | | | | |
| 100 UNT | ALTO | turbiedad RESIDUAL | 35 | 38 | 40 | 42 | 45 | 47 | 15.0 | 8.0 | 7.3 | 8.3 | 9.3 | 15.0 | 16.3 | 9.0 | 7.6 | 8.9 | 9.9 | 200 | |
| | | | 95.5 | 95.8 | 97.6 | 96.5 | 96.3 | 95.8 | 96.3 | 96.3 | 98.0 | 98.2 | 97.9 | 97.7 | 96.3 | 95.9 | 97.8 | 98.1 | 97.8 | 97.5 | 95.0 |
| 180 UNT | MEDIO | turbiedad inicial | 20 | 24 | 27 | 30 | 33 | 35 | 12.0 | 11.0 | 8.7 | 8.0 | 7.5 | 9.3 | 14.0 | 15.0 | 12.0 | 9.0 | 8.3 | 9.9 | 160 |
| | | | 95.0 | 95.7 | 96.6 | 96.8 | 95.7 | 94.3 | 96.1 | 96.9 | 97.1 | 97.3 | 96.7 | 95.0 | 94.6 | 95.7 | 96.8 | 97.0 | 96.5 | 94.3 | 94.3 |
| 180 UNT | BAJO | turbiedad RESIDUAL | 14 | 16 | 18 | 20 | 24 | 26 | 9.6 | 9.4 | 7.5 | 7.3 | 5.7 | 7.4 | 7.5 | 11.0 | 8.9 | 7.3 | 6.0 | 9.0 | 170 |
| | | | 80.0 | 80.7 | 87.8 | 91.2 | 86.0 | 83.7 | 83.5 | 87.5 | 87.8 | 90.5 | 87.7 | 87.5 | 81.7 | 85.2 | 87.8 | 90.0 | 85.0 | 85.0 | 71.7 |
| 100 UNT | ALTO | turbiedad RESIDUAL | 1.0 | 3.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 13.0 | 13.0 | 10.0 | 7.1 | 9.0 | 14.2 | 16.0 | 15.6 | 7.5 | 8.0 | 10.0 | 170 | |
| | | | 95.8 | 95.7 | 96.3 | 97.9 | 97.3 | 96.8 | 96.8 | 96.5 | 97.5 | 98.2 | 97.8 | 96.5 | 96.0 | 96.1 | 98.1 | 98.0 | 97.5 | 95.8 | 95.8 |
| 180 UNT | MEDIO | turbiedad inicial | 1.0 | 3.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 18.0 | 18.0 | 13.0 | 10.0 | 12.9 | 17.0 | 14.0 | 13.0 | 9.0 | 10.0 | 14.0 | 170 | |
| | | | 93.9 | 94.2 | 94.2 | 96.8 | 95.0 | 94.7 | 95.6 | 95.4 | 96.4 | 95.4 | 95.4 | 95.9 | 95.0 | 95.4 | 96.8 | 96.4 | 95.0 | 93.9 | 93.9 |
| 180 UNT | BAJO | turbiedad RESIDUAL | 1.0 | 3.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 9.3 | 7.4 | 10.0 | 17.0 | 11.0 | 9.0 | 7.3 | 6.0 | 8.0 | 120 |
| | | | 78.3 | 77.5 | 81.7 | 83.3 | 75.0 | 74.5 | 83.3 | 84.5 | 85.0 | 87.7 | 83.3 | 71.7 | 81.7 | 85.0 | 87.8 | 90.0 | 86.7 | 80.0 | 80.0 |
| MUCILAGO MACERADO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DOSIS | | mg/L | PRUEBA 1 | | | | | | REPÚBLICA 1 | | | | | | REPÚBLICA 2 | | | | | | |
| 100 UNT | ALTO | turbiedad RESIDUAL | 58.0 | 51.3 | 49.0 | 53.0 | 55.5 | 57.5 | 59.6 | 57.0 | 48.6 | 52.0 | 53.3 | 58.0 | 54.3 | 53.0 | 49.0 | 51.3 | 54.0 | 540 | |
| | | | 85.5 | 87.2 | 87.8 | 86.8 | 86.1 | 85.6 | 85.1 | 85.8 | 87.9 | 87.0 | 86.7 | 86.7 | 85.5 | 86.4 | 86.8 | 87.8 | 87.5 | 87.2 | 86.5 |
| 180 UNT | MEDIO | turbiedad inicial | 45.6 | 43.0 | 41.0 | 39.5 | 42.0 | 45.0 | 47.0 | 44.6 | 42.0 | 41.0 | 46.0 | 47.9 | 45.0 | 41.0 | 40.5 | 43.0 | 48.0 | 500 | |
| | | | 83.7 | 84.6 | 85.4 | 85.9 | 85.0 | 83.9 | 83.2 | 84.1 | 85.0 | 85.4 | 83.6 | 82.9 | 83.9 | 85.4 | 85.5 | 84.6 | 82.9 | 82.1 | 82.1 |
| 180 UNT | BAJO | turbiedad RESIDUAL | 23.0 | 22.0 | 21.0 | 17.0 | 22.0 | 23.4 | 25.0 | 22.0 | 21.3 | 18.0 | 21.0 | 23.3 | 23.0 | 20.9 | 20.8 | 17.8 | 19.7 | 220 | |
| | | | 61.7 | 63.3 | 65.0 | 71.7 | 63.3 | 61.0 | 58.3 | 63.3 | 64.5 | 70.0 | 65.0 | 61.2 | 57.9 | 65.2 | 65.3 | 70.3 | 67.2 | 63.3 | 63.3 |
| 100 UNT | ALTO | turbiedad RESIDUAL | 58.0 | 56.0 | 55.0 | 53.0 | 54.4 | 57.0 | 58.0 | 57.4 | 48.0 | 52.6 | 55.0 | 58.0 | 57.0 | 56.8 | 41.0 | 57.7 | 54.9 | 570 | |
| | | | 85.5 | 86.0 | 86.3 | 86.8 | 86.4 | 85.8 | 85.5 | 85.7 | 88.0 | 86.9 | 86.3 | 85.5 | 85.8 | 86.8 | 89.8 | 85.0 | 86.3 | 85.8 | 85.8 |
| 180 UNT | MEDIO | turbiedad inicial | 48.0 | 45.3 | 46.0 | 43.6 | 45.0 | 47.0 | 37.0 | 33.0 | 29.0 | 31.6 | 36.6 | 38.0 | 38.9 | 31.0 | 28.0 | 32.0 | 38.0 | 430 | |
| | | | 82.9 | 83.8 | 84.3 | 84.4 | 82.9 | 83.2 | 86.8 | 88.2 | 89.6 | 88.7 | 86.9 | 86.4 | 86.1 | 88.9 | 90.0 | 88.6 | 86.4 | 84.6 | 84.6 |
| 180 UNT | BAJO | turbiedad RESIDUAL | 20.0 | 16.0 | 12.0 | 15.0 | 17.0 | 20.9 | 27.0 | 23.0 | 13.0 | 25.0 | 26.5 | 27.0 | 29.8 | 27.0 | 20.9 | 25.5 | 28.0 | 29.7 | |
| | | | 66.7 | 73.3 | 80.0 | 75.0 | 71.7 | 65.2 | 55.0 | 61.7 | 80.0 | 58.3 | 55.8 | 55.0 | 50.3 | 55.0 | 65.2 | 57.5 | 53.3 | 52.2 | 52.2 |
| CLORURO FÉRRICO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DOSIS | | mg/L | PRUEBA 1 | | | | | | REPÚBLICA 1 | | | | | | REPÚBLICA 2 | | | | | | |
| 100 UNT | ALTO | DOSIS | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 55 | 3.5 | 2.0 | 3.7 | 3.3 | 3.9 | 4.0 | 3.6 | 2.0 | 3.7 | 3.6 | 4.0 | 4.6 | |
| | | | 99.1 | 99.4 | 99.3 | 99.1 | 99.1 | 99.0 | 99.1 | 99.5 | 99.1 | 99.2 | 99.0 | 99.0 | 99.0 | 99.1 | 99.5 | 99.1 | 99.1 | 99.0 | 98.9 |
| 180 UNT | MEDIO | turbiedad inicial | 1.8 | 1.2 | 1.3 | 1.5 | 0.6 | 0.8 | 1.3 | 1.0 | 1.1 | 0.7 | 0.7 | 1.5 | 1.3 | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.6 | 1.6 | |
| | | | 99.4 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.8 | 99.7 | 99.5 | 99.6 | 99.6 | 99.6 | 99.8 | 99.7 | 99.5 | 99.5 | 99.6 | 99.5 | 99.5 | 99.4 | 99.4 |
| 180 UNT | BAJO | DOSIS | 8.0 | 10.0 | 12.0 | 14.0 | 16.0 | 18.0 | 2.0 | 0.8 | 1.7 | 2.0 | 2.4 | 5.0 | 2.8 | 1.3 | 0.9 | 1.9 | 2.7 | 8.0 | |
| | | | 95.7 | 98.2 | 97.0 | 96.7 | 95.8 | 95.0 | 95.8 | 98.7 | 97.2 | 96.7 | 96.0 | 91.7 | 95.3 | 97.8 | 98.5 | 96.8 | 95.5 | 86.7 | 86.7 |
| 100 UNT | ALTO | CONCENTRACION % | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 5.0 | 10.0 | 3.1 | 3.5 | 2.0 | 3.0 | 3.3 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 2.7 | 2.8 | 3.0 | 3.5 | |
| | | | 99.1 | 99.3 | 99.2 | 99.3 | 99.0 | 99.2 | 99.1 | 99.5 | 99.2 | 99.2 | 99.0 | 99.0 | 99.0 | 99.0 | 99.0 | 99.3 | 99.3 | 99.3 | 99.1 |
| 180 UNT | MEDIO | turbiedad inicial | 1.5 | 1.1 | 0.8 | 0.9 | 1.2 | 1.5 | 1.7 | 1.3 | 0.6 | 1.0 | 1.8 | 2.1 | 1.6 | 1.3 | 0.8 | 1.3 | 1.9 | 2.6 | |
| | | | 99.5 | 99.6 | 99.7 | 99.7 | 99.6 | 99.5 | 99.4 | 99.5 | 99.8 | 99.6 | 99.4 | 99.3 | 99.4 | 99.5 | 99.7 | 99.5 | 99.3 | 99.1 | 99.1 |
| 180 UNT | BAJO | CONCENTRACION % | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 5.0 | 10.0 | 2.8 | 2.8 | 1.1 | 2.3 | 2.9 | 3.0 | 3.0 | 2.8 | 2.2 | 2.5 | 3.1 | 3.8 | |
| | | | 96.6 | 97.5 | 98.5 | 97.5 | 96.9 | 95.0 | 95.3 | 96.7 | 98.2 | 96.2 | 95.3 | 95.0 | 95.0 | 95.0 | 95.3 | 95.3 | 94.8 | 93.7 | 93.7 |

Anexo 14. Matriz de operalización

| RESUMEN NARRATIVO | INDICADORES | MEDIOS DE VERIFICACIÓN | CONDICIONES DE ÉXITO |
|---|---|--|--|
| JUSTIFICACIÓN Uso de agua tratada por proceso fisicoquímico de coagulación – floculación con coagulante natural orientada a mejorar la calidad del agua del canal de regadío contaminada para el fin de uso de riego de áreas verdes del campus universitario | Uso de coagulantes de <i>Opuntia ficus-indica</i> Medición de turbiedad | Registro de parámetros Datos estadísticos | Establecer normas Adopción de métodos de tratamiento de agua con polímeros naturales Uso de biopolímeros alternos que no son prioridad alimentaria |
| OBJETIVO GENERAL Evaluar la remoción de turbiedad de agua de canal de riego mediante tratamiento químico por coagulación-floculación con dos métodos de extracción de coagulante de mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> a escala laboratorio. | <ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de remoción de turbiedad y Turbiedad residual con uso de diferentes coagulantes • Tratamiento del agua en las mismas condiciones con coagulante químico para comparación | Determinación de los parámetros óptimos por el diseño de kruskal Wallis. | Parámetros de calidad de agua para riego de áreas verdes se ajustan a Normas EPA establecidos |
| OBJETIVO ESPECÍFICO 3 Evaluar el sistema de tratamiento físico-químico a través de la eficiencia de remoción de turbiedad con un análisis estadístico de kruskal Wallis. | <ul style="list-style-type: none"> • P-valué • Turbiedad residual • Porcentaje de remoción | Medición de parámetros: Turbidímetro HANNA | Datos confiables Numero de repeticiones adecuadas |
| OBJETIVO ESPECÍFICO 2 Determinar las condiciones óptimas de dosis y concentración para el funcionamiento del sistema con el coagulante de polímero natural. | <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de mezcla de la prueba de jarras (RPM) • Tiempo de coagulación, floculación y sedimentación • Dosis y concentraciones • Turbiedad inicial (Alta, media y baja) • Parámetros constantes <ul style="list-style-type: none"> o pH o Temperatura o Oxígeno disuelto o Sólidos totales disueltos o Conductividad eléctrica | Medición de parámetros: pH-metro HANNA Multiparámetro HANNA LIAM Multiparámetro HANNA Multiparámetro HANNA Multiparámetro HANNA Turbidímetro HANNA | Disponibilidad del laboratorio Materiales, reactivos, equipos calibrados y disponibilidad Muestra de agua homogénea |

| | | |
|--|--|--|
| <p>OBJETIVO ESPECÍFICO 1 Diseñar e implementar las pruebas de tratabilidad a escala piloto del método de extracción del coagulante de mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i></p> | <ul style="list-style-type: none"> Métodos de extracción de <i>Opuntia ficus-indica</i> | <p>Materiales y equipos en buenas condiciones Biopolímeros disponibles Determinación de condiciones para el procedimiento de prueba de jaras adecuadas</p> |
| <p>RECURSOS Asesor Personal voluntario Materiales e insumos a utilizar</p> | <p>Presupuesto</p> | <p>Disponibilidad del laboratorio LIAM Materiales, reactivos, equipos calibrados y disponibilidad Muestra de agua homogénea</p> |
| | | |
| | | |
| Aprobación y financiamiento | | |